

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
**Институт новых материалов и технологий**  
**Нижнетагильский технологический институт (филиал)**

Б. П. ЮРЬЕВ  
Н. А. СПИРИН  
О. Ю. ШЕШУКОВ  
В. А. ГОЛЬЦЕВ  
О. И. ШЕВЧЕНКО  
А. А. МЕТЕЛКИН

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ С ВЫСОКИМИ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

*Монография*

Нижний Тагил  
2018

УДК 669.16:622.341.1–182  
ББК К3  
Р17

**Рецензенты:**

директор по науке и технике ОАО «Научно-исследовательский институт  
металлургической теплотехники «ВНИИМТ» (г. Екатеринбург),  
лауреат Премии Совета Министров СССР, заслуженный металлург РФ,  
д-р техн. наук, проф. Г. М. Дружинин;  
гл. науч. сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки,  
Институт металлургии УрО РАН (г. Екатеринбург),  
д-р техн. наук, проф. А. Н. Дмитриев

**Р17      Разработка технологий для производства железорудных окатышей  
с высокими металлургическими свойствами :** научная монография /  
Б. П. Юрьев, Н. А. Спирин, О. Ю. Шешуков, В. А. Гольцев, О. И. Шевченко,  
А. А. Метелкин ; М-во образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. пер-  
вого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). –  
Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. – 172 с.  
ISBN 978-5-9544-0091-5

На основе полученных данных о закономерностях протекания ос-  
новных физико-химических процессов в обжигаемом слое железорудных  
окатышей рассмотрены различные технологии, позволяющие получать  
окатыши с оптимальным сочетанием прочностных свойств и восстано-  
вности. Даны рекомендации по оптимизации режимных параметров про-  
цесса обжига на конвейерных машинах.

Предназначена для инженерно-технических работников горно-  
обогажительных комбинатов, специалистов научно-исследовательских  
и проектных институтов, может быть полезна преподавателям, студентам  
и аспирантам металлургических специальностей.

Библиограф.: 67 назв. Рис. 56. Табл. 44.

**УДК 669.16: 622.341.1–182  
ББК 34.31**

**ISBN 978-5-9544-0091-5**

© Юрьев Б. П., Спирин Н. А., Шешуков О. Ю.,  
Гольцев В. А., Шевченко О. И., Метелкин А. А., 2018  
© ФГАОУ ВО НТИ (филиал) УрФУ  
© ФГАОУ ВО УрФУ

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ, СПОСОБОВ И ТЕХНОЛОГИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВО ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ С ВЫСОКИМИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ.....	9
1.1. Разработка способа получения частично диссоциированных окатышей из качканарского концентрата .....	9
1.2. Исследование влияния параметров термообработки на металлургические свойства качканарских окатышей .....	22
1.3. Исследование и разработка оптимальных режимов термообработки качканарских окатышей.....	33
1.4. Разработка способов получения прочных окатышей при восстановлении .....	44
1.5. Совершенствование режимов обжига окатышей Качканарского ГОКа.....	53
1.6. Улучшение металлургических свойств окатышей Качканарского ГОКа.....	63
1.7. Влияние качества концентрата из различных титаномагнетитовых руд на металлургические свойства офлюсованных окатышей.....	78
1.8. Изменение прочности железорудных окатышей в процессе термической обработки и способы ее повышения .....	95
1.9. Разработка технологии доменной плавки на железорудном сырье с различной основностью .....	107
1.10. Совершенствование методики определения показателей комкуемости железорудных концентратов .....	113
1.11. Разработка метода расчета характеристик поровой структуры окатышей.....	124
1.12. Разработка технологии получения качканарских окатышей из концентрата, содержащего боратовую руду .....	132
2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД И КОНЦЕНТРАТОВ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ ПЕРЕДЕЛАМ .....	147
2.1. Применение сверхвысокочастотных полей для сушки железорудных концентратов.....	147
2.2. Разработка технологии обогащения лисаковских гидрогетитовых руд с использованием энергии сверхвысоких частот .....	152
2.3. Разработка способа окускования доменных шламов и мартеновских пылей с извлечением цинка при нагреве в полях СВЧ .....	174
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	190

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Для удовлетворения потребностей доменного производства качественными железорудными окатышами (содержание окатышей в доменной шихте непрерывно возрастает) необходимо разрабатывать такие технологии, которые позволят получать их с высокими металлургическими свойствами как в исходном состоянии, так и в процессе восстановления. С целью разработки и обоснования этих технологий авторами монографии проведено большое количество экспериментов, позволяющих моделировать условия термообработки окатышей на конвейерных обжиговых машинах. Причем эксперименты проводились с качканарскими офлюсованными окатышами, проплавляемыми в доменных печах Нижнетагильского металлургического комбината. В результате был получен целый комплекс данных по прочностным характеристикам окатышей, который позволял с использованием результатов расчетов с помощью разработанной математической модели выбирать оптимальные режимы термообработки, обеспечивающие получение окатышей, в наибольшей степени удовлетворяющих требованиям доменной плавки.

В монографии рассмотрены различные технологии и способы получения окатышей, позволяющие повышать их металлургическую ценность. Повышенный интерес представляет разработанная технология по получению частично диссоциированных окатышей, которые восстанавливаются в верхних горизонтах доменной печи при более высоких температурах, при которых не происходит их интенсивного разбухания и разрушения на стадии перехода гематита в магнетит. Заслуживает особого внимания разработанная новая экономически эффективная и экологически чистая технология с использованием нетрадиционных видов энергии, например, энергии сверхвысоких частот. Она использована для сушки железорудных супер концентратов, при обогащении лисаковских руд и т. д.

Научная монография написана сотрудниками ИНМТ (Института новых материалов и технологий) и Нижнетагильского технологического института (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». Полученные

в монографии результаты представляют определенный интерес для специалистов, занимающихся вопросами подготовки и использования железорудного сырья в металлургических переделах. Они позволяют также разрабатывать новые технологии и способы получения окатышей с высокими металлургическими свойствами.

Монография предназначена для инженерно-технических работников проектных институтов и промышленных предприятий, а также может быть полезна преподавателям, студентам старших курсов и аспирантам высших учебных заведений.

Авторы благодарят директора по науке и технике ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ВНИИМТ), лауреата Премии Совмина СССР, заслуженного металлурга РФ, доктора технических наук, профессора Г. М. Дружинина и доктора технических наук, профессора, главного научного сотрудника федерального государственного бюджетного учреждения «Институт металлургии Уральского отделения РАН» А. Н. Дмитриева за ценные замечания, сделанные при рецензировании монографии. Учет этих замечаний, несомненно, способствовал улучшению содержания представленного материала.

Авторы считают выход в свет этой монографии своевременным и осознают, что работа над совершенствованием технологии подготовки железных руд к пирометаллургическим переделам будет продолжаться.

Авторы просят читателей свои отзывы направлять по адресу: 620002, Екатеринбург, ул. Мира 28, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», институт новых материалов и технологий (ИНМиТ), а также по электронной почте [immt@urfu.ru](mailto:immt@urfu.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный рост объема производства черных металлов, сопровождающийся возрастанием доли окучкованного сырья в шихте доменных печей, невозможен без интенсификации производства и повышения качества окучкованного продукта. Увеличение объема производства окатышей достигается путем ввода в эксплуатацию новых мощностей, а также за счет повышения удельной производительности действующего оборудования и, в частности, обжиговых конвейерных машин.

Рост удельной производительности обжиговых машин возможен как за счет интенсификации нагрева слоя, так и за счет повышения качества исходных окатышей, а, следовательно, и увеличения выхода годного продукта.

Качество производимых в настоящее время окатышей еще не в полной мере удовлетворяет требованиям доменной плавки. Недостаточно изучены причины и механизмы разупрочнения окатышей при восстановлении в условиях, приближенных к доменной плавке.

Повышение температуры и продолжительности термообработки нижних горизонтов слоя позволяет получать более однородные по химическому составу и металлургическим свойствам окатыши. Это достигается путем интенсификации прогрева слоя при повышении температурно-фильтрационного режима, либо использования твердого топлива.

Снижение разрушаемости обожженных окатышей при последующем переделе может быть достигнуто за счет применения различных добавок в шихту и режима термообработки для получения необходимого фазового состава, способного при высокой степени восстановления сохранять прочность окатышей.

Окислительный обжиг в настоящее время является одним из важнейших технологических этапов производства окатышей пирометаллургическим способом. В отечественном производстве окатышей используются концентраты, получаемые обогащением магнетитовых руд, что обусловлено достаточной простотой и относительно небольшими затратами на обогащение методом магнитной сепарации.

По требованиям доменщиков производимые окатыши в стране являются преимущественно офлюсованными, что усложняет их производство, снижает содержание железа и увеличивает расход энергоносителей.

На Урале основным поставщиком офлюсованных железорудных окатышей, используемых в доменных печах Нижнетагильского металлургического комбината, является Качканарский горно-обогатительный комбинат (КГОК). Поэтому в монографии уделено большое внимание разработке способов и технологий, обеспечивающих получение окатышей с высокими металлургическими свойствами. Проведено большое количество экспериментов, моделирующих условия слоевой термообработки качканарских окатышей применительно к обжиговым конвейерным машинам и позволяющих разрабатывать оптимальные режимы обжига в различных газовых средах при изменении параметров в широких пределах.

Изучен механизм разупрочнения окатышей как при окислительном их обжиге, связанный с возникновением в окатышах напряжений, так и при восстановлении в верхних горизонтах доменной печи, связанный с переходом гематита в магнетит.

Разработана технология доменной плавки на разноосновном качканарском железорудном сырье. Проведены исследования по изучению влияния состава газовой среды и основности окатышей на их структуру и металлургические свойства, а также содержания топлива в шихте и основности на структуру и свойства агломерата. Установлено, что применение низкоосновных окатышей и высокоосновного агломерата, слабо разрушающихся при восстановлении, обеспечивает высокую газопроницаемость в верхних горизонтах доменной печи.

Показано, что наличие амфотерных оксидов титана и алюминия в качканарских агломератах и окатышах, а также понижение угла наклона шахты в доменной печи предотвращает раннее слипание шихтовых материалов в нижних горизонтах, что обеспечивает ровный сход шихты, высокую степень использования восстановительного потенциала и, соответственно, повышение производительности и снижение расхода кокса.

Проведен анализ работ по оптимизации технологии получения окатышей из качканарского концентрата. Установлено, что повышение качества этих окатышей можно достигнуть в результате внедрения технологии обжига окатышей с частичной диссоциацией гематита. Выполнена комплексная оценка металлургических свойств частично диссоциированных окатышей. Показано, что окатыши с гемато-магнетитовой структурой, полученной при частичной диссоциации гематита, восстанавливаются при более высоких температурах, когда не происходит их интенсивного разбухания и разрушения на стадии перехода гематита в магнетит.

Получен целый комплекс данных по прочности окатышей в исходном состоянии и при восстановлении, позволяющий с использованием результатов расчета по математической модели степеней окисления титаномагнетита и содержания монооксида железа выбирать оптимальный режим термообработки, обеспечивающий получение окатышей в наибольшей степени удовлетворяющий требованиям доменной плавки.

Разработан ряд рекомендаций по осуществлению оптимальных режимов с использованием слабоокислительной атмосферы в зоне обжига конвейерной машины КГОКа, позволяющих окислять и упрочнять окатыши до требуемых величин, а также достигать необходимой степени диссоциации для обеспечения высоких прочностных свойств при восстановлении.

Установлена оптимальная степень диссоциации окатышей, повышающая технико-экономические показатели работы доменных печей.

Проведены исследования и изучено влияние качества концентрата, полученного из отдельных разновидностей титаномагнетитовых руд КГОКа, на свойства офлюсованных окатышей. Результаты исследований позволяют оценивать свойства окатышей из разновидностей концентратов и их смесей в произвольных пропорциях для широкого диапазона температур обжига и выбирать для промышленного получения те из них, металлургические свойства которых выше.

Разработана технология получения качканарских окатышей и концентрата, содержащего боратовую руду. Изучены технологические аспекты производства борсодержащих окатышей. Рассмотрено влияние добавок боратовой руды на прочность, восстановимость и разбухание окатышей при восстановлении. Показано, что введение бора в качканарское ванадийсодержащее сырье позволяет исключить из доменной шихты агломерат, не содержащий ванадий.

Разработаны экономически эффективные и экологически чистые технологии с использованием нетрадиционных видов энергии – энергии сверхвысоких частот (СВЧ). Применение сверхвысокочастотных полей позволило эффективно использовать их для сушки суперконцентратов, т. к. отсутствие продуктов сгорания обеспечивает высокую чистоту высушенного концентрата. Разработана схема обогащения лисаковских руд с применением СВЧ-энергии. Предложен способ окускования доменных шламов и мартеновских пылей с извлечением цинка при нагреве в полях СВЧ.



# **1. РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ, СПОСОБОВ И ТЕХНОЛОГИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВО ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ С ВЫСОКИМИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

## **1.1. Разработка способа получения частично диссоциированных окатышей из качканарского концентрата**

Доменная плавка предъявляет повышенные требования к качеству окискованного сырья, в частности окатышей из качканарских титаномagnetитов [1, 2]. В настоящем исследовании рассматривается способ термообработки офлюсованных качканарских окатышей. Этот метод позволяет получать сырье, приближающееся по качеству к требованиям, изложенным в работе [3]. Для разработки технологии термообработки окатышей изучали влияние особенностей протекания окислительно-восстановительных реакций на структуру и прочностные свойства окатышей как в исходном состоянии, так и при их восстановлении.

Окисление титаномagnetитовых окатышей изучено в работах [4, 5, 6, 7]. При реально используемых скоростях нагрева в промышленных агрегатах 1,3–1,7 °C/с основная масса окатышей окисляется в диапазоне температур 800–1200 °C. При этом лимитирующим звеном реакций является доступ кислорода по порам окатышей к реакционной зоне, вследствие чего структура не полностью окисленных окатышей зональна, представлена magnetитовым ядром и гематитовой оболочкой. Прочность обожженных при 1250–1380 °C окатышей мала, составляет менее 980 Н/окатыш, не зависит от температуры обжига. Это объясняется образованием в ходе охлаждения крупных концентрических трещин на границе зон. Избежать их возможно лишь путем полного окисления. Для окатышей диаметром 12–14 мм полное окисление наблюдается в случае, когда время их нахождения при температуре 800–1200 °C не менее 380–480 с. При этом прочность окатышей возрастает и достигает значений 1960–3400 Н/окатыш. Окисление в указанном температурном интервале протекает с максимальной скоростью. Повышение температуры приводит к появлению микровключений расплава. С одной стороны, расплав тормозит окисление вследствие жидкофазного спекания [8], а с другой – способствует диссоциации гематита:



На воздухе реакция (1.1) протекает, когда давление диссоциации  $P_{O_2}$  превышает парциальное давление кислорода  $2,06 \cdot 10^4$  Па. В случае чистых

реагентов соотношение давлений  $P_{O_2} > 2,06 \cdot 10^4$  Па возможно при темпера-

туре обжига выше  $1383^\circ\text{C}$  [9]. Однако та часть рудных зерен, которая находится в контакте с оксидной жидкостью, образует с ней растворы. В этом случае давление диссоциации изменяется. Величину давления можно определить по формуле [9]

$$P_{O_2}^{0.5} = (P_{O_2})_0^{0.5} \frac{(a_{Fe_2O_4})_{\text{нас}}^2 (a_{Fe_2O_3})^3}{(a_{Fe_2O_4})^2 (a_{Fe_2O_3})_{\text{нас}}^3}, \quad (1.2)$$

где  $(P_{O_2})_0$  – давление диссоциации в смеси чистых взаимно нерастворимых оксидов;  $a_{Fe_2O_3}$  и  $a_{Fe_2O_4}$  – активности гематита и магнетита в растворе;  $(a_{Fe_2O_3})_{\text{нас}}$  и  $(a_{Fe_2O_4})_{\text{нас}}$  – активности гематита и магнетита в насыщенном растворе.

Для идеальных и бесконечно разбавленных растворов можно принять активности равными или пропорциональными концентрациям реагентов. Тогда формула (1.2) примет вид

$$P_{O_2}^{0.5} = (P_{O_2})_0^{0.5} \frac{(N_{Fe_2O_4})_{\text{нас}}^2 (N_{Fe_2O_3})^3}{(N_{Fe_2O_4})^2 (N_{Fe_2O_3})_{\text{нас}}^3}. \quad (1.3)$$

где  $N_{Fe_2O_3}$  и  $N_{Fe_2O_4}$  – мольные доли гематита и магнетита;  $(N_{Fe_2O_3})_{\text{нас}}$  и  $(N_{Fe_2O_4})_{\text{нас}}$  – растворимости гематита и магнетита в расплаве.

При охлаждении качканарских окатышей первой фазой, кристаллизующийся из шлакового расплава, является гематит [8]. При небольших перегревах над линией ликвидуса концентрация гематита близка к насыщению и, следовательно, можно записать

$$N_{Fe_2O_3} \approx (N_{Fe_2O_3})_{\text{нас}}.$$

В этом случае соотношение (1.3) упростится и примет вид

$$P_{O_2}^{0.5} = (P_{O_2})_0^{0.5} \frac{(N_{Fe_2O_4})_{нас}^2}{(N_{Fe_2O_4})^2}. \quad (1.4)$$

Полученная зависимость указывает на то, что давление диссоциации тем больше, чем выше растворимость магнетита и чем меньшее количество магнетита перешло в расплав. При подстановке величины растворимости магнетита в кальций-железосиликатном расплаве 0,10–0,11 при температурах 1250 и 1350 °С в формулу (1.4) нетрудно убедиться, что давление диссоциации превышает парциальное давление кислорода в воздухе, если содержание двухвалентного железа в расплаве, пересчитанное на количество растворенного магнетита, соответственно меньше 19 и 25 % (по массе).

Ниже приведены данные микронзондового анализа состава шлаковых включений качканарских окатышей:

Компонент	$\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$
Содержание, %	11,0–20,0	20,0–25,0	33,0–40,0	1,5–2,0	5,0–5,5	1,0–3,0

По данным анализа, содержание  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в шлаковых включениях не превышает 20 %.

С момента появления расплава при температуре 1250–1350 °С равновесное давление кислорода по реакции (1.1) превышает его парциальное давление в воздухе, и на контакте жидкости с зернами гематита начинается диссоциация. Сказанное подтверждается микрофотографиями шлифов окатышей, обожженных при 1250 °С и охлажденных в токе воздуха.

Количество продиссоциировавшего гематита растет с повышением температуры выдержки в течение 6 мин и увеличением количества общего содержания шлакообразующих оксидов кальция, кремния, алюминия и магния ( $\sum \text{Me}_x\text{O}_y$ ), вносимых концентратом, флюсом и связующим. Эта зависимость показана на рис. 1.1.

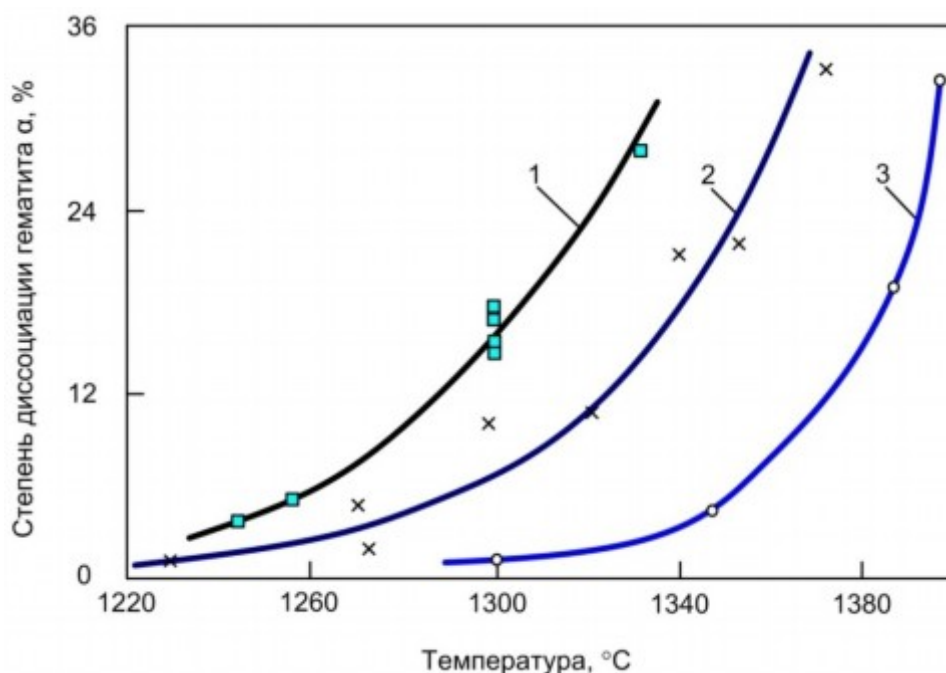


Рис. 1.1. Зависимость степени диссоциации гематита в предварительно полностью окисленных окатышах от температуры их обжига в течение 6 мин на воздухе:

1 – 62 %  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ , 13,50 % ( $\sum \text{Me}_x\text{O}_y$ ),  $B = 1,56$ ;

2 – 61%  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ , 12,50 % ( $\sum \text{Me}_x\text{O}_y$ ),  $B = 1,15$ ;

3 – 65 % Fe<sub>общ</sub>, 6,11 % ( $\sum \text{Me}_x\text{O}_y$ ), B = 0,80 (B – основность окатышей)

Все эти факты находят свое объяснение при условии, что скорость диссоциации определяется величиной реакционной поверхности и температурой, т. е.

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = SK_o \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1.5)$$

где  $\alpha$  – степень диссоциации;

$\tau$  – время;

$S$  – площадь реакционной поверхности;

$K_o$  – предэкспоненциальный множитель;

$E$  – энергия активации;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – температура обжига окатышей.

С повышением температуры окатышей с заданным составом шихты возрастает количество микрообъемов, в которых возможно локальное образование расплава. Оксиды кремния, кальция и алюминия в ходе реакций с магнетитом и гематитом образуют легкоплавкие соединения [8]. Таким образом, введение этих оксидов приводит к росту количества жидкого шлака при заданной температуре. Число гематитовых зерен, контактирующих с расплавом и способных к диссоциации, увеличивается. Другими словами, с повышением температуры и ростом количества шлакообразующих оксидов возрастает реакционная поверхность и, согласно формуле (1.5), скорость диссоциации.

Минералогический анализ частично диссоциированных офлюсованных образцов из концентратов с содержанием железа 60,8 и 62,3 %, обожженных при температуре 1250–1350 °С на воздухе, показывает их однородную структуру, а именно, неизменную концентрацию магнетита и гематита по сечению окатышей. Этот факт свидетельствует о том, что для твердофазных связанных с газовыделением взаимодействий, удаление газообразных продуктов по порам не тормозит реакцию. По-видимому, лимитирующими являются стадии, связанные с кристаллохимическим превращением гематита в магнетит или массообменными процессами на границе диссоциирующих зерен со шлаком и газом. При достаточно хорошем

усреднении шихты в ходе окомкования известняк, являющийся инициатором шлакообразования при обжиге, равномерно распределен по сечению окатыша. Это обеспечивает равномерность распределения капелек жидкости и прилегающих к ним зерен магнетита, возникающих в ходе диссоциации.

Беззональная структура частично диссоциированных окатышей и повышенное количество расплава, образующегося при растворении магнетита, определяют интенсивное спекание в присутствии жидкой фазы [10]. Это обеспечивает высокую прочность окатышей при сжатии [11], которая составляет 2940–3400 Н/окатыш. Каркас окатышей представлен единой рудношлаковой массой, причем магнетитовые и гематитовые зерна окружены железо-кальций-силикатным стеклом.

Термогравиметрические кривые частично диссоциированных брикетов при 1350 °С в атмосфере, содержащей 33 % СО и 67 % СО<sub>2</sub>, совпадают с таковыми для образцов из железо-кальций-силикатных стекол (рис. 1.2, линии 2 и 3) [3]. Окисленный титаномагнетит без шлаковой связки восстанавливается значительно интенсивнее и при более низких температурах (рис. 1.2, кривая 1).

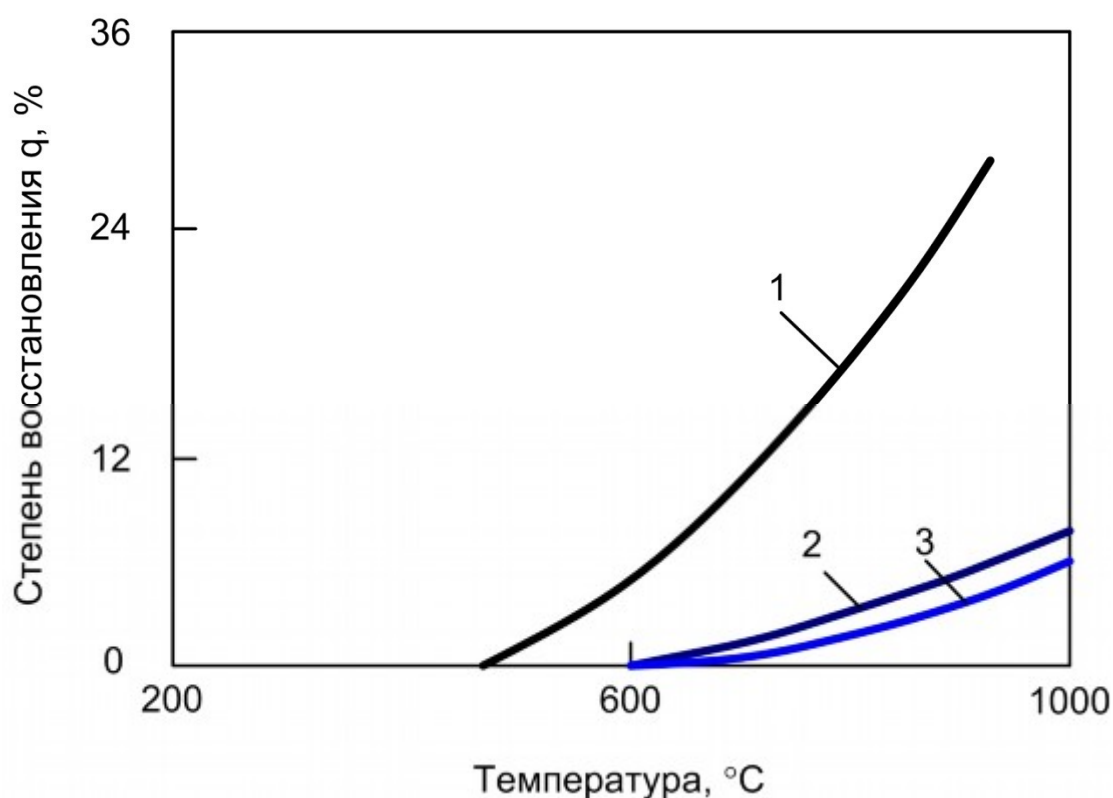


Рис. 1.2. Термогравиметрические кривые брикетов:  
 1 – окисленный при 1000 °С титаномагнетитовый концентрат;  
 2 – кальций-железосиликатное стекло с  $Fe^{2+}/Fe^{3+} = 2,0$ ; 3 – частично диссоциированные брикеты при 1350 °С в течение 6 мин на воздухе

Эти факты можно объяснить следующим образом. Восстановление оксидов железа шлака протекает в интервале 750–1000 °С и не сопровождается растрескиванием шлакового каркаса. Восстановительный газ может достигнуть зерен гематита или магнетита только в случае полного восстановления оксидов железа в близлежащих шлаковых слоях. Иными словами, имеет место последовательное взаимодействие газа со шлаковой связкой и рудными зернами, а лимитирующей стадией является восстановление оксидов железа в связке. Последний процесс и определяет область температур, при которых восстанавливается частично диссоциированный окатыш, т. е. температуры выше 750 °С. При этих температурах разбухание гематитовых зерен не превышает 3 % (рис. 1.3), а структура как восстановленной, так и не восстановленной частей окатыша довольно плотная.

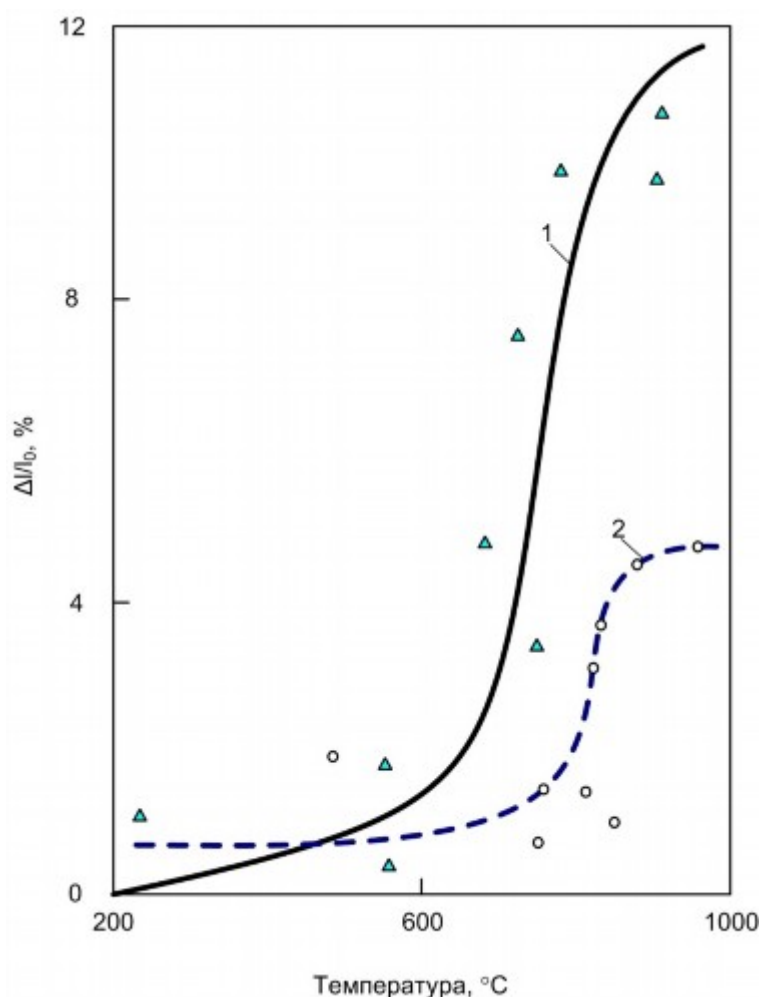


Рис. 1.3. Изменение линейных размеров окисленных титаномagnetитовых зерен при нагревании со скоростью 10 °С/мин

в токе восстановительного газа, содержащего 33 % CO и 67 % CO<sub>2</sub>,  
с температурой 20 (1) и 800 °C (2)

Другая картина имеет место при восстановлении полностью окисленных окатышей. В этом случае связка между зернами оксидов железа рудношлакового типа. Поверхность гематитовых частиц полностью не ошлакована и имеет непосредственный контакт с поровым пространством, заполненным восстановительным газом. Переход гематита в магнетит в таких окатышах начинается с 550 °C и сопровождается увеличением их линейных размеров более, чем на 10 % (рис. 1.3). Столь активное разбухание приводит к возникновению напряжений, разрушающих шлаковые связки, потере прочности окатыша. Структура окатышей представлена совокупностью иссеченных трещинами шлаковых включений и практически не связанных между собой рудных зерен.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что уменьшить разупрочнение качканарских офлюсованных окатышей в ходе восстановления можно, формируя при обжиге слабо восстановимую шлаковую связку в виде железо-кальций-силикатного стекла. Для образования шлаковой связки необходимо двухвалентное железо, входящее в состав магнетита. Получить достаточное его количество в предварительно окисленных окатышах возможно, осуществляя при обжиге частичную диссоциацию гематита до магнетита.

Для оценки металлургических свойств частично диссоциированных окатышей провели укрупненные лабораторные опыты на установке типа аглочаша. Основность офлюсованных известняком окатышей составляла  $B = 1,25$ . Окатыши получали из качканарского концентрата с общим содержанием железа ( $Fe_{общ}$ ) 62,3 %. Высота обжигаемого слоя на установке составляла 120 мм, содержание кислорода над слоем 12–18 %.

Поиск оптимальных параметров нагрева и обжига, обеспечивающих получение окатышей высокого качества, осуществлен с помощью рототабельного центрального композиционного плана второго порядка, который включает 16 опытов четырехфакторного эксперимента [12]. В качестве независимых переменных (факторов) приняты параметры, которые могут оказывать существенное влияние на степень окисления магнетита и высокотемпературной диссоциации гематита, а именно:  $x_1$  – время выдержки при 1000 °C при максимальной скорости окисления;  $x_2$  – температура;  $x_3$  – время высокотемпературного обжига;  $x_4$  – диаметр окатыша. Ниже приве-



дены значения  $\Delta x_i$  (шаг варьирования  $i$ -го фактора), кодированные значения факторов (уровни варьирования параметров) и их натуральные значения:

Фактор		$\Delta x_i$	Натуральные значения факторов при уровнях				
Обозначение	Ед. измерения		–2	–1	0	+1	+2
$x_1$	с	300	60	360	660	960	1260
$x_2$	°C	50	1200	1250	1300	1350	1400
$x_3$	с	120	60	180	300	420	540
$x_4$	мм	2	9	11	13	15	17

Натуральные значения  $X_i$  определяли по выражению

$$X_i = (x_i - x_{0,i})/\Delta x_i,$$

где  $x_i$  и  $x_{0,i}$  – текущее и нулевое значения  $i$ -го параметра;

$\Delta x_i$  – шаг варьирования  $i$ -го параметра.

В качестве зависимых переменных приняты показатели металлургических свойств окатышей:  $y_1$  – прочность при раздавливании;  $y_2$  – прочность на удар после испытания в барабане;  $y_3$  и  $y_4$  – соответственно прочность и истираемость при восстановлении по ГОСТ 19575–74.

Комплексную оценку качества окатышей проводили по критерию  $Y$  (функции желательности), предложенному в работе [13]:

$$Y = (d_1, d_2, \dots, d_n)^{1/n},$$

где  $d_i$  – безразмерная величина, определяемая по значению  $i$ -го показателя.

Величину  $d_i$  определяли по выражению

$$d_i = \exp \left[ -\exp \left( -2 \frac{y_i - \overline{y_i}}{y_i^* - y_i} \right) \right],$$

где  $\overline{y_i}$  и  $y_i^*$  – среднее и лучшее значения зависимой переменной  $y_i$ .

Связь между показателями качества  $Y$  и параметрами обжига  $x_i$  выражали в виде полиномов следующего типа:

$$y = \sum_{i,j=0}^4 A_{i,j} X_i Y_j.$$

Проверку адекватности модели проводили по критерию Фишера [12]. Значимые (с вероятностью более 0,95) коэффициенты  $A_{i,j}$  приведены ниже:

Зависимые переменные		Значение $A_{i,j}$ при					
Обозначение	Ед. измерения	$x_0 = 1$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1 x_4$
$y_1$	Н/окатыш	1830	50,500	–	–	–	21,500
$y_2$	Выход, %, класса менее 5 мм	6,910	–3,690	–	–	3,860	–3,540

у <sub>3</sub>	Выход, %, класса более 10 мм	11,100	–	7,800	–	–	–
у <sub>4</sub>	Выход, %, класса менее 5 мм	70,100	–	–11,500	–	–	–
у	Доли ед.	0,155	0,132	–	–	0,109	–

На рис. 1.4 показаны зависимости показателей качества окатышей диаметром 13,0 мм от времени предварительного окисления и температуры над слоем окатышей при обжиге.

Время обжига не оказывает существенного влияния на прочностные свойства окатышей. Истираемость окатышей при восстановлении существенно снижается с повышением температуры над слоем, а выход крупных классов увеличивается. На рис. 1.4, а, б показан выход после восстановления классов более 10 мм ( $B_{+10}$ ) и менее 5 мм ( $B_{-5}$ ). Повышение прочностных свойств сопровождается ростом содержания монооксида железа в обожженных окатышах (рис. 1.4, в). Рост содержания монооксида железа с уменьшением времени окислительного обжига обусловлен недоокислением первичного магнетита, а повышение температуры приводит к диссоциации гематита до магнетита.

Окатыши, малоокисленные при 1000 °С, имеют при заданной температуре большее количество монооксида железа, чем полностью окисленные перед высокотемпературным обжигом. Однако зависимости прочностных свойств при восстановлении от времени окислительной выдержки не выявлены. По-видимому, это обусловлено следующим. Основным фактором, определяющим появление необходимого количества шлака для экранирования рудных зерен от непосредственного контакта с восстановительным газом, является температура обжига. Небольшого количества магнетита, независимо от его происхождения, очевидно, достаточно для обогащения расплава двухвалентным железом, способствующим застыванию оксидной жидкости в виде слабо восстановимого стекла. Окатыши с такой связкой в меньшей степени подвержены разрушению при восстановлении.

Прочность (П) и истираемость (И) в исходном состоянии (в противоположность этим характеристикам при восстановлении) соответственно увеличиваются и снижаются с ростом времени предварительного окисления в изученном интервале температур 1200–1360 °С (рис. 1.4, д, е). Низкие механические характеристики не полностью окисленных окатышей, как отмечалось, связаны с их зональным строением. Полностью окисленные окатыши однородны и прочны.

Перечисленные особенности влияния времени выдержки и температуры окислительного обжига на прочностные свойства окатышей в исходном состоянии и при восстановлении приводят к тому, что функция жела-

тельности  $Y$ , показывающая уровень качества окатышей, растет с увеличением времени выдержки 0–960 с и температуры обжига 1200–1360 °С (рис. 1.4, *г, ж*). Увеличение этих параметров сверх указанных пределов нежелательно, т. к. может привести к потере прочности и сплавлению окатышей. При времени выдержки 960 с и температуре обжига 1370 °С получаются частично диссоциированные окатыши с прочностью, большей 2000 Н/окатыш. Выход мелких классов (0–5 мм) после восстановления по ГОСТ 19575–74 составляет менее 50 %. Действующая на Качканарском горно-обогатительном комбинате технология обжига окатышей предусматривает время подогрева около 300 с и более низкую температуру обжига 1300–1327 °С. Это обуславливает невысокую прочность окатышей в исходном состоянии и повышенную разрушаемость при восстановлении.

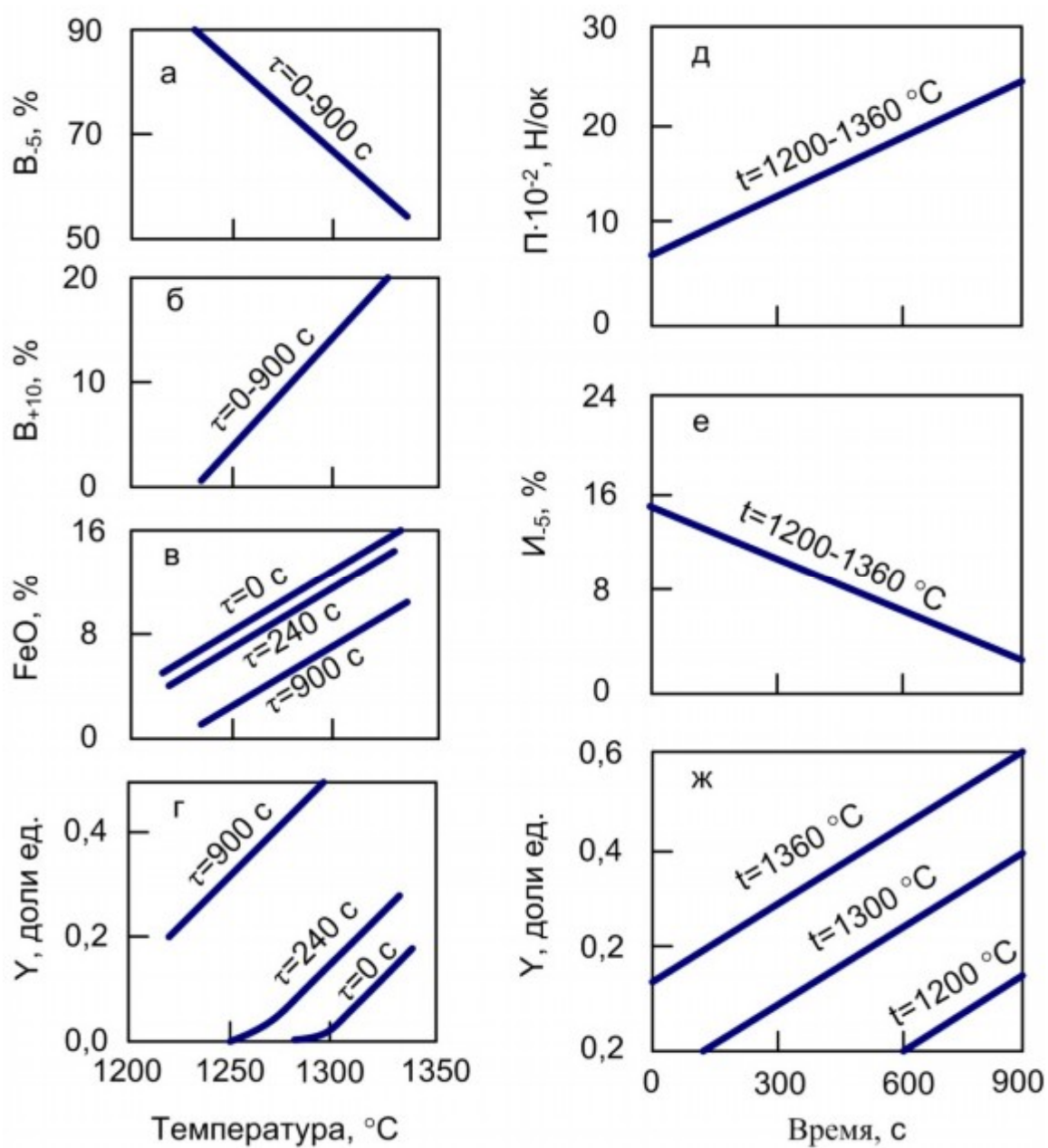


Рис. 1.4. Зависимости показателей качества окатышей, обожженных на установке аглочаша, от температуры обжига (а–г) и времени окислительной выдержки при 1000 °С (д–ж)

Таким образом, в офлюсованных известняком качканарских окатышах на воздухе показана возможность диссоциации гематита при температурах ниже 1380 °С в присутствии кальций-железосиликатного расплава. Качканарские офлюсованные и обожженные при температурах 1300–1327 °С окатыши с гематито-магнетитовой структурой, полученной при частичной диссоциации гематита, имеют стеклообразную связку. Восстановление таких окатышей протекает при температурах выше 700 °С, когда не происходит их интенсивного разбухания и разрушения на стадии перехода гематита в магнетит.

## **1.2. Исследование влияния параметров термообработки на металлургические свойства качканарских окатышей**

Моделирование условий слоевой термообработки качканарских окатышей на конвейерных обжиговых машинах при различных скоростях нагрева и вариантах подачи хладагента осуществляли в печи Таммана, позволяющей создавать в ее рабочем пространстве различные атмосферы [14]. Исследованию подвергали офлюсованные до основности 1,2 окатыши, химический и гранулометрический составы компонентов шихты которых приведены в табл. 1.1.

Температуры обжига окатышей для верха, середины и низа слоя составляли соответственно 1320–1350, 1270 и 1230 °С. Для случая плавного режима нагрева окатышей во время их подогрева предусматривалась окислительная выдержка при 1050 °С. Скорость охлаждения окатышей составляла 100 °С/мин. Установили, что изменение скорости нагрева и содержания кислорода в газовой фазе при нагреве и охлаждении приводили к получению окатышей с разными степенями окисления титаноманетита и диссоциации гематита. Связь прочности окатышей с содержанием монооксида железа FeO представлена на рис. 1.5. Видно, что для окатышей верхних слоев, обожженных при 1320–1350 °С, превышающих температуру начала диссоциации гематита, фактором, определяющим их прочность, являются условия термообработки, а не содержание FeO.

Таблица 1.1

Химический и гранулометрический составы компонентов шихты

Компонент	Содержание, %									Содержание, %, фракции, мм		
	Fe <sub>общ</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ПМПП	>0,1	0,1–0,074	<0,074
Качканарский концентрат	62,5	27,9	1,1	3,1	2,3	2,5	2,9	0,6	1,0	2,2	11,8	86,0
Известняк	2,2	0,5	54,0	0,8	0,5	0,2	0,02	–	40,5	0,2	8,4	91,4
Бентонит	3,6	1,3	5,2	59,1	2,8	15,3	–	–	5,0	0,6	20,4	19,0
Необожженные окатыши	58,9	25,1	4,5	3,9	–	–	–	–	–	–	–	–





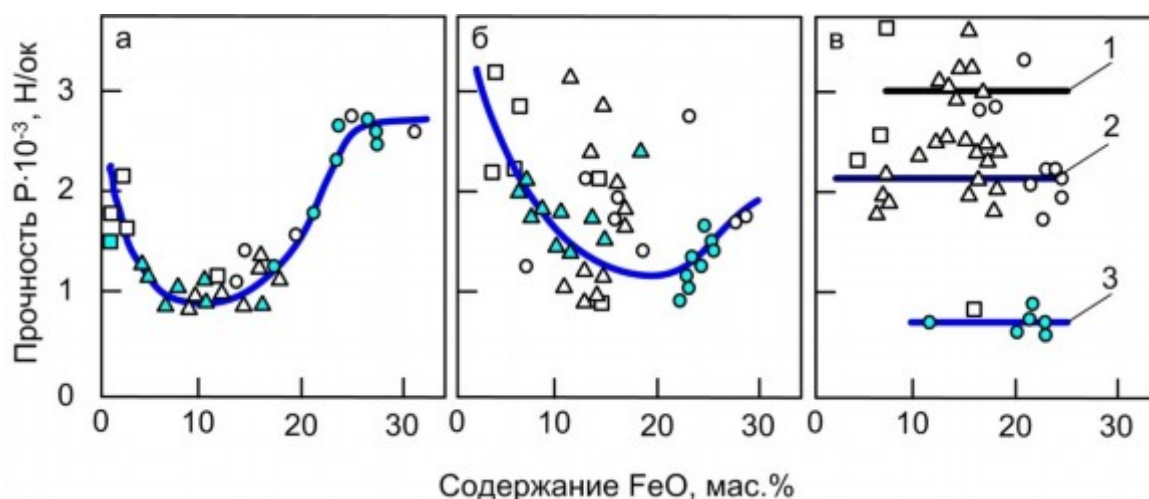


Рис. 1.5. Влияние содержания FeO в окатышах на их прочность:  
*а, б, в* – низ, середина и верх слоя;  $\circ$  – интенсивный нагрев, охлаждение до 900 °С  
 в безокислительной среде;  $\bullet$  – интенсивный нагрев, охлаждение  
 в кислородосодержащей среде;  $\Delta$  – плавный нагрев, охлаждение  
 по схеме сверху вниз;  $\blacktriangle$  – плавный нагрев, охлаждение по схеме  
 снизу вверх;  $\square$  – окислительный обжиг;  
*1, 2, 3* – группы окатышей со средней прочностью 0,8; 2,2 и 3,0 кН/окатыш

Результаты опытов рассмотрены для трех групп окатышей, имеющих прочность 3,0; 2,2 и 0,8 кН/окатыш. К первой группе относятся окатыши, полученные при плавном режиме нагрева, степень окисления магнетита в которых перед высокотемпературной зоной достигала 90 %. Независимо от содержания кислорода в газовой фазе зон обжига и охлаждения при непрерывном снижении температуры в зоне безреверсивного охлаждения их прочность достигает 3,0–3,6 кН/окатыш. К этой же группе примыкают окатыши, полученные при интенсивном нагреве, обожженные в атмосфере, содержащей 0,1–10,0 % кислорода, и охлажденные без реверса хладагента в бескислородной среде. Во второй группе сосредоточены окатыши, полученные при плавном нагреве и охлажденные за счет реверса хладагента. К третьей группе относятся окатыши со средней прочностью 0,8 кН/окатыш, интенсивно нагретые и обожженные в атмосфере, содержащей 0,1–10,0 % кислорода, и охлажденные при 1350–900 °С в окислительной атмосфере, содержащей 2,5–10,0 % кислорода. Минералогическим анализом диаметральных срезов обожженных окатышей разных режимов термообработки в структуре выявлены микрзоны в виде ядра и оболочки, различающиеся по площади и взаимному расположению зерен магнетита и гематита.

Представленные на рис. 1.5 зависимости  $P = f(\text{FeO})$  для разных горизонтов слоя можно объяснять с точки зрения следующей гипотезы [15]. Суть ее заключается в том, что в магнетито-гематитовых окатышах на границе микрозон за счет различных температурных интервалов отвердевания шлаковых составляющих в ходе охлаждения возникают напряжения, приводящие к разупрочнению или упрочнению обожженных окатышей. Специально поставленные опыты по температурной зависимости эффективной вязкости неоокисленных (1) и окисленных (2) брикетов из офлюсованного до основности 1,3 качканарского концентрата (рис. 1.6) показали, что вязкость брикетов резко изменяется при 1170–1210 °С для гематитовых и при 1050–1130 °С для магнетитовых образцов. Границы этих интервалов близки к температурам начала кристаллизации расплавов соответственно в окисленном и неоокисленном материале, определенным по диаграммам состояния многокомпонентных систем оксидов [11]. Следовательно, при отвердевании расплава магнетитовые зоны переходят из пластического состояния в упругое при температурах на 100–200 °С более низких, чем гематитовые. Указанные переходы сопровождаются изменениями размеров соответствующих зон.

Таким образом, различие в составе расплава взаимно контактирующих зон окатыша приводит к тому, что магнетитовые участки переходят в упругое состояние с уменьшением размера в тот момент, когда гематитовые уже отвердели и практически не меняют свой объем. В результате на границе макрозон возникает напряженное состояние, влияющее на прочностные характеристики обожженных окатышей.

В ходе термообработки окатышей в регулируемой по содержанию кислорода атмосфере, как показали минералогические исследования, возможно получать двух- и трехзонные магнетито-гематитовые окатыши. Двухзонные окатыши, состоящие из магнетитового ядра и гематитовой оболочки, формируются, как правило, в условиях, когда режим их термообработки не обеспечивает полного окисления первичного магнетита и существенной диссоциации гематита. Такие условия создаются либо при недостатке кислорода, либо при быстром нагреве с последующим обжигом при температурах, близких к температуре начала диссоциации. К этой группе относятся все окатыши, содержащие 5–20 % FeO и обожженные при 1230–1300 °С (рис. 1.5, *а*, *б* и *в*, кривая 1). Расчеты показали, что в таких окатышах на границе макрозон возникают растягивающие напряжения в ядре и оболочке, стремящиеся оторвать их друг от друга. Величина напряжений превышает пределы прочности наиболее прочных фаз, имеющих в окатышах, что приводит к образованию макротрещин на границе структурных зон и разупрочнению окатышей.

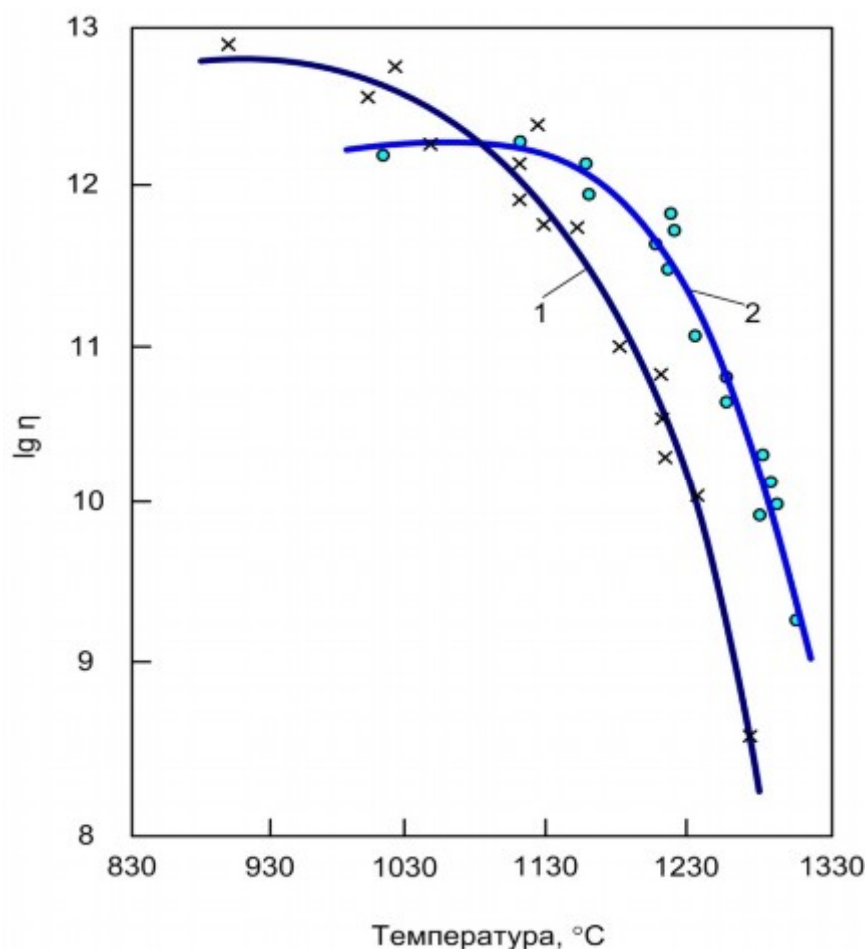


Рис. 1.6. Изменение логарифма вязкости ( $\lg \eta$ ) брикетов из офлюсованного до основности 1,3 качканарского титаномагнетитового концентрата с ростом температуры:  
1, 2 – окисленные брикеты

В случае, когда гематито-магнетитовая структура формируется в окатышах, прошедших предварительное окисление и последующий высокотемпературный обжиг с частичной диссоциацией гематита, разупрочнения при охлаждении не наблюдается (рис. 1.5, в, кривые 2 и 3). Это связано с кинетическим режимом диссоциации, развивающимся на границе рудных и шлаковых зерен, и соответствующим отсутствием макрозон, на границе которых развиваются напряжения.

Обжиг при температурах, превышающих начало диссоциации, допускает интенсификацию нагрева с формированием в окатышах трехзонной структуры, состоящей из магнетитового ядра и гематито-магнетитовой оболочки. Наличие трехзонной структуры способствует перераспределению напряжений и приводит к уменьшению образования макротрещин и повышению прочностных характеристик обожженных окатышей.

Для удобства использования полученных данных в сочетании с результатами расчетов основные значения прочности приведены в табл. 1.2. Представленные в ней величины прочности относятся только к режимам, реализация которых возможна на конвейерных обжиговых машинах ОК–228, включающим окислительный нагрев, слабоокислительный обжиг и окислительное охлаждение.

Влияние содержания FeO на разбухание окатышей и выход пылевидных классов при восстановлении представлено на рис. 1.7. Основными факторами, определяющими свойства окатышей при восстановлении, являются температура обжига и содержание FeO независимо от того, является ли она первичной, оставшейся из-за недоокисления титаномагнетита, или вторичной, появившейся в результате диссоциации гематита.

Необходимо отметить, что при содержании FeO, равном 1–12 %, абсолютные значения разбухания высокотемпературных (1300–1350 °С) окатышей в 1,5–2,0 раза меньше, чем у окатышей, обожженных при 1230–1270 °С. Различия связаны с формированием при высокотемпературном обжиге с частичной диссоциацией гематита шлаковых связей на основе слабовосстановимых оливинов и стекла. При этом восстановление рудных зерен смещается в область высоких температур (800–900 °С), где степень их разбухания значительно ниже, чем при восстановлении в области температур 550–650 °С (рис. 1.8).

Таблица 1.2

**Зависимость прочности окатышей от характеристик окислительно-восстановительных реакций**

Температура обжига, °С	FeO, %	$\alpha_{ок}^H$	Прочность при спекании, кН/окатыш
1200–1230	0–3	–	1,8
	4–20	–	1,0
	21–25	–	2,0
1240–1320	2–6	–	2,0
	8–20	–	1,0
	22–25	–	1,5
1330–1370	–	0–30	0,6
	–	40–70	0,8
	–	80–100	2,2

Зависимости разбухания и истираемости окатышей от содержания в них FeO носят немонотонный характер (рис. 1.7) во всем изученном интервале температур. При содержании FeO, равном 12–15 % окатыши не меняют своих прочностных свойств, при 15–20 % FeO разбухание снижается, а в случае FeO больше 20 % окатыши практически не разбухают. Это связано с особенностями структуры и зональным характером восста-

новления окатышей. Действительно, в низкотемпературных окатышах (рис. 1.7, кривая 1) при FeO меньше 12 % гематитовая оболочка занимает больше половины объема окатышей. В условиях верхних горизонтов доменных печей, когда при 600–800 °С интенсивно разбухает гематит, фронт восстановления таких окатышей не достигает магнетитового ядра и их разрушение не зависит от его объема и связанного с ним содержания FeO.

Рост содержания FeO и соответственно объемной доли ядра приводит к тому, что часть высокомоноксидных окатышей, представленная магнетитом, восстанавливается без разбухания и снижает общее разрушение при восстановлении. В случае, когда содержание FeO больше 20 %, практически весь окатыш имеет магнетитовый состав и, соответственно, не разбухает, слабо истираясь в ходе восстановления. Для удобства полученные данные сведены в табл. 1.3, где они увязаны с содержанием FeO после окончания термообработки, которая рассчитывается по специально созданной математической модели.

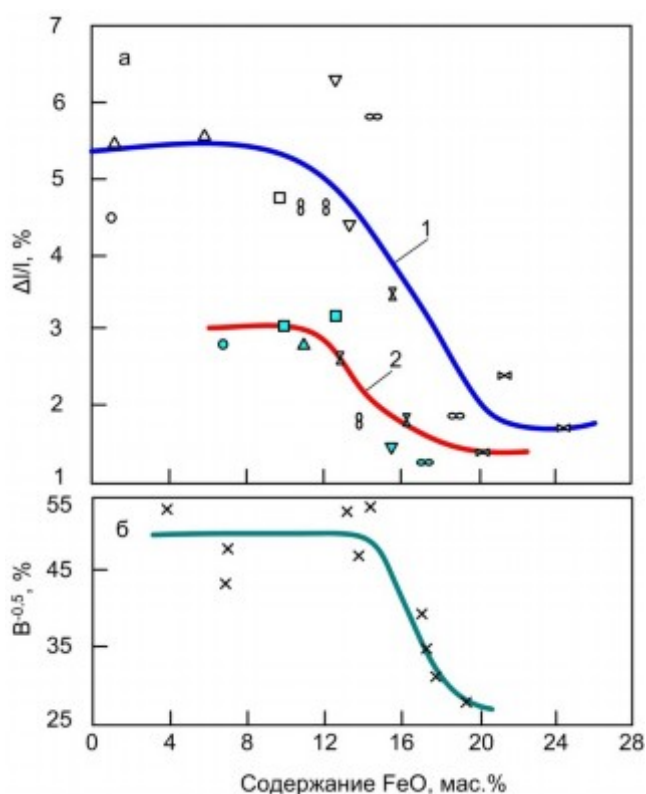


Рис. 1.7. Влияние содержания FeO в окатышах на их разбухание (а) и истираемость (б) при восстановлении:  
1, 2 – температура обжига 1230–1270 и 1300–1350 °С; ○, △, ●, ▲ – окислительный режим термообработки; □, ▽, ■, ▼ – окислительный нагрев и обжиг, безокислительное охлаждение; ∂, ∞, ∞ – окислительный нагрев и 3/4 времени обжига, безокислительные 1/4 времени обжига и охлаждение; ⋈, ⋉, ⋊, ⋋ – окислительный нагрев и 1/4 времени обжига, безокислительные 3/4 времени обжига и охлаждение

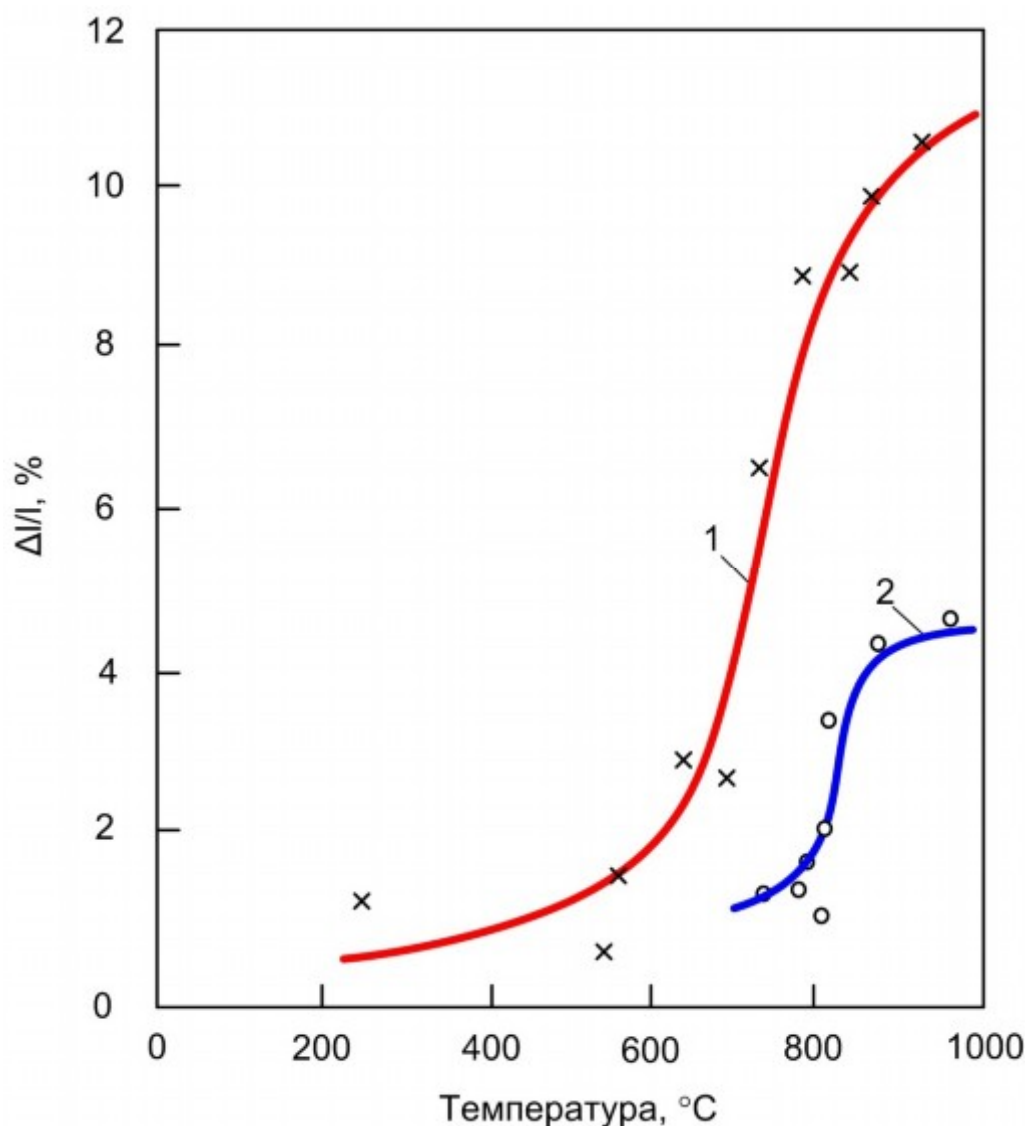


Рис. 1.8. Изменение относительных размеров предварительно окисленных зерен качканарского концентрата в ходе восстановления;  
1, 2 – подача восстановительного газа при 20 и 800 °С

Таким образом, полученный комплекс данных по прочности окатышей в исходном состоянии и при восстановлении позволяет с использованием результатов расчета по математической модели степеней окисления титаномагнетита и содержания FeO выбирать оптимальный режим термообработки, обеспечивающий получение окатышей, в наибольшей степени удовлетворяющих требованиям доменной плавки. Ниже рассмотрены примеры такого подхода к использованию математической модели.

Таблица 1.3

**Зависимость разбухания при восстановлении окатышей от содержания FeO**

Температура обжига, °С	FeO, %	Линейное разбухание, %	Истираемость*, %
1200–1300	0–15	5,5	65
	15–20	4,0	55
	20–25	2,0	45
1330–1360	5–15	3,0	35
	15–20	2,0	25
	20–25	1,5	20

\*По ГОСТ 19575 ( $B^{-0,5}$ )

Экспериментальные данные, полученные на промышленных конвейерных машинах ОК–228, позволяют связать требуемые для расчета параметры в любой точке обжигаемого слоя – скорость нагрева и объемное содержание кислорода – с максимальной температурой обжига в горне  $t_{\max}$  и содержанием кислорода в горячем дутье  $(O_2)_{\text{гор}}$ . Изменяя в широком диапазоне указанные параметры ( $t_{\max} = 1300\text{--}1360$  °С,  $(O_2)_{\text{гор}} = 16,5\text{--}21,0$  %), выполнили расчеты изменения содержания FeO, степеней окисления и диссоциации гематита по ходу обжига в разных точках слоя. Достижение температуры на границе слой–постель 1230 °С соответствует производительности машины 165–170 т/ч, а температуры 1200 °С – 175–180 т/ч.

Результаты расчетов представлены в табл. 1.4. Из нее следует, что расчетные и фактические значения содержания FeO для одного из анализируемых вариантов ( $t_{\max} = 1350$  °С;  $(O_2)_{\text{гор}} = 17$  %) практически совпадают. Незначительное расхождение, имеющееся для нижнего слоя, связано с тем, что во время отбора проб с движущихся паллет не представлялось возможным разделить слой на три части, как это делалось в расчете. Следовательно, представленная модель адекватно отражает протекание окислительно-восстановительных реакций в слое и может быть использована для сравнения режимов обжига.

Для обжига с использованием регулируемой среды (режимы 1–4) установлено, что применяемый в настоящее время плавный нагрев (нагрев с температурами в зонах подогрева порядка 800 °С и обжига 1 1200–1250 °С с последующей высокотемпературной обработкой в зонах обжига 2 и рекуперации при 1300–1350 °С) позволяет достичь высокой степени окисления при нагреве ( $\alpha_{\text{ок}}^H = 80$  %) окатышей верхнего слоя, обжигаемых при 1300–1360 °С. В этом случае, согласно табл. 1.2, достигаются высокие



прочности окатышей на уровне 2,0–2,2 кН/окатыш. Близкие значения  $P = 1,6–1,8$  кН/окатыш получены и в промышленных опробованиях. В то же время содержание FeO окатышей верхнего и среднего слоев существенно меняются с температурой обжига, уменьшаясь от 18 % при 1370 °С до 3 % при 1310 °С. В соответствии с данными табл. 1.3 следует ожидать, что окатыши, обожженные при 1300 °С, будут очень сильно разбухать и истираться при восстановлении на 65 %. Наиболее приемлемыми с точки зрения производства малоразрушающихся при восстановлении окатышей представляются режимы с повышенными температурами обжига в интервале температур 1300–1360 °С. Использование наиболее высокотемпературных режимов ( $t_{\max} = 1370–1380$  °С) приводит, особенно при низкой производительности, к высокому содержанию FeO, равному 8–10 % в средних слоях и соответственно низкой их прочности в исходном состоянии (табл. 1.4).

Таблица 1.4

**Изменение основных показателей процессов окисления магнетита и диссоциации гематита в окатышах диаметром 12 мм по длине и высоте обжигаемого слоя применительно к конвейерной машине ОК–228**

Параметры термообработки*			Часть слоя	$t_{\text{сл}},$ °С	Окисление при нагреве (расчет)		Диссоциация (расчет)		Окисление при охлаждении	
номер режима	$t_{\max},$ °С	$(\text{O}_2)_{\text{гор}},$ %			$\alpha_{\text{ок}}^{\text{H}},$ %	FeO, %	$\alpha_{\text{дис}},$ %	FeO, %	$\alpha_{\text{ок}}^{\text{H}},$ %	FeO **, %
1	1370	17,1	Верх	1360	81,81	4,60	79,07	20,96	4,62	18,44
			Сере- дина	1320	82,33	4,47	39,81	12,87	16,24	10,76
			Низ	1280	89,39	2,67	11,50	6,75	31,81	4,53
			Слой– по- стель	1250	99,15	0,21	0	0,21	77,30	0,05
2	1350	17,0	Верх	1330	79,02	5,31	62,81	17,92	39,51	10,88
			Сере- дина	1290	84,35	3,96	25,62	9,55	26,07	6,99
			Низ	1250	87,29	3,21	6,52	4,74	49,61	2,34
			Слой– по-	1220	98,59	0,36	0	0,36	84,83	0,05



			стель							
3	131 0	16,5	Верх	130 0	79,3 7	5,22	41,08	13,58	76,8 6	3,11
			Сере- дина	126 0	91,7 9	2,09	12,68	5,12	54,9 3	2,26
			Низ	122 0	99,2 6	0,19	0,91	0,43	57,1 3	1,05
			Слой– по- стель	119 0	99,7 9	0,56	0	0,56	90,7 3	0,05
4	138 0	17,5	Верх	136 0	81,8 1	4,60	79,07	20,96	4,62	18,4 4
			Сере- дина	130 0	85,4 2	3,68	29,19	10,12	22,6 0	7,76
			Низ	123 0	91,7 6	2,08	2,93	2,82	54,4 6	1,26
		Слой–постель	1200	99,8 0	0,60	0	0,6 0	90,8 0	0,04	

\*Минимальное содержание кислорода в слое составило 3,5 %.

\*\* Содержание FeO, полученное расчетом.

Следовательно, оптимальным в регулируемой атмосфере следует считать режим 2 с температурой обжига 1350 °С. Он обеспечит близкие прочности окатышей верхнего и нижнего слоев на уровне 1,8–2,0 кН/окатыш при пониженной до 1,0–1,2 кН/окатыш в среднем. Истираемость таких окатышей ( $B^{-0,5}$ ) ожидается равной 40–50 %.

Таким образом, анализ процесса обжига окатышей с помощью математической модели подтвердил, что эмпирически выбранный режим работы конвейерной машины ОК-228 с регулируемой атмосферой близок к оптимальному. Он включает плавный окислительный подогрев окатышей в зонах нагрева и обжига 1, высокотемпературный обжиг при 1340–1360 °С с минимальным содержанием кислорода в вакуум-камерах 11 и 12, равной 3,5 % и с последующим окислительным охлаждением.

### 1.3. Исследование и разработка оптимальных режимов термообработки качканарских окатышей

Металлизация качканарских окатышей – одно из звеньев технологии производства ванадийсодержащих сталей с использованием губчатого железа. Непосредственное легирование стали ванадием, содержащимся в этих окатышах, позволяет снизить его потери по сравнению с действующей схемой переработки ванадийсодержащих титаномагнетитов. Однако металли-

зация окатышей, производимых на КГОКе, связана со значительным их разупрочнением и разрушением в условиях работы шахтной печи. Кроме того, отмечена сравнительно невысокая восстановимость качканарского сырья.

В работе [16] проведены исследования, позволяющие выбирать направление изменения технологии производства качканарских окатышей с целью повышения уровня их металлургических свойств. Окатыши крупностью 12–14 мм изготавливали на тарельчатом грануляторе, общая пористость их составляла 29–30 %. Связующей добавкой служил бентонит, а флюсующей – известняк с основностью  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,25$ . Окатыши подвергали обжигу в печи Таммана по трем режимам с предварительным окислением в воздушной среде при 1000 °С и высокотемпературной обработкой при 1200–1350 °С в течение 8 мин. Режимы отличались длительностью первой стадии (10–15 мин – режимы 1 и 3, 2–3 мин – режим 2) и степенью окисленности на второй стадии, проведенной в атмосфере гелия с добавкой 1 %  $\text{O}_2$  (режимы 1 и 2) и 10 %  $\text{O}_2$  (режим 3). Исследование кинетики восстановления проводили на дериватографе ОД–102. В качестве газа-восстановителя применяли водород в смеси с гелием. Основную массу опытов выполняли при содержании 20 %  $\text{H}_2$  и 80 %  $\text{He}$ . Однако полученные закономерности проверяли также при концентрациях водорода 50 %.

В условиях, аналогичных описанному, изучали кинетику изменения размера окатышей с помощью дилатометрической приставки к дериватографу. Химический состав и прочность окатышей после обжига и восстановления приведены в табл. 1.5–1.8. Структура окисленных, частично диссоциированных после полного окисления и интенсивно нагретых окатышей сильно различается. Минералогические исследования показали, что начиная с температуры 1200 °С, во всех окатышах появляется расплав, причем в окисленных зонах офлюсованных окатышей он кристаллизуется преимущественно в виде ферритов и силикатов кальция, а в неофлюсованных выпадают минералы типа фаялита и образуется стекло. С ростом температуры и появлением магнетита расплав активно растворяется в кальций-силикатном расплаве офлюсованных окатышей, увеличивая его количество и способствуя остекловыванию при охлаждении.

Таблица 1.5

**Характеристика обожженных неофлюсованных окатышей**

Режим	Параметры и показатели процесса обжига				
	Продолжительность обжига, мин	Температура обжига, °С	Содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ , %	Содержание $\text{FeO}$ , %	Прочность $P_{\text{исх}}$ , Н/окатыш
Атмосфера обжига – гелий					
1	15	1200	60,4	5,3	3010
	15	1250	60,8	10,9	3870
	15	1320	61,5	17,2	2500
	15	1350	61,3	14,5	2890

2	2	1200	61,1	11,3	1180
	2	1250	61,3	11,5	1290
	2	1320	62,0	18,1	1900
	2	1350	61,6	21,0	2260
Окислительная атмосфера					
3	15	1200	60,5	1,09	3000
	15	1250	59,7	7,06	2520
	15	1320	60,4	5,59	2580
	15	1350	59,6	8,70	2220

Процессы диссоциации в окатышах, обожженных в окислительной и слабоокислительной средах, различаются. Во втором случае процесс развивается зонально и с поверхности образуется пленка, состоящая из зерен магнетита, цементируемых шлаком. Окатыши, обожженные в окислительных условиях, характеризуются равномерным распределением магнетита в объеме, зерна которого состыкованы со шлаком.

Структура интенсивно нагретых окатышей характеризуется наличием чисто магнетитового ядра и оболочки гематито-магнетитового состава. Если интенсивно нагретые окатыши обжигались и охлаждались в слабоокислительной среде, то на поверхности имеется магнетито-шлаковое кольцо, причем шлак застывает в виде стекла.

Таблица 1.6

#### Характеристика восстановленных неофлюсованных окатышей

Режим	Показатели процесса восстановления						
	Прочность после восстановления, Н/окатыш, при $t$ , °С		Степень восстановления, %, при $t$ , °С			Максимальное разбухание, %	$\tau_{35}$ , мин
	600	900	1100	600	900		
1	390	2030	66	27,2	30,0	2,0	76
	100	1660	70	26,8	29,3	–	69
	100	1370	60	26,8	28,4	–	83
	100	1950	38	28,4	28,3	1,0	91
2	150	560	70	30,9	29,5	–	72
	150	560	75	30,9	29,5	–	74
	550	1410	62	27,0	24,0	–	69
	550	1410	44	27,5	24,0	–	82
3	510	1810	65	27,8	30,0	2,6	69
	510	1810	58	27,8	30,0	–	72
	100	1620	60	28,1	29,1	–	81
	140	1340	50	27,5	26,2	2,0	90

Таблица 1.7

#### Характеристика обожженных офлюсованных окатышей

Режим	Параметры и показатели процесса обжига				
	Продолжительность обжига, мин	Температура обжига, °С	Содержание Fe <sub>общ</sub> , %	Содержание FeO, %	Прочность $P_{исх}$ , Н/окатыш
Атмосфера обжига – гелий					
1	10	1200	58,4	9,0	1430
	10	1250	58,7	11,1	1660
	10	1320	59,0	18,5	2870
	10	1350	59,0	20,1	1720
2	2	1200	58,4	7,1	950
	2	1250	59,1	15,8	1680
	2	1320	58,9	20,4	3000
	2	1350	59,3	22,1	3180
Окислительная атмосфера					
3	10	1200	57,9	1,46	2370
	10	1250	57,5	1,70	1710
	10	1320	59,5	17,1	2940
	10	1350	58,8	15,9	4450

Таблица 1.8

## Характеристика восстановленных офлюсованных окатышей

Режим	Показатели процесса обжига						
	Прочность после восстановления, Н/окатыш, при $t$ , °С		Степень восстановления, %, при $t$ , °С			Максимальное разбухание, %	$\tau_{35}$ , мин
	600	900	1100	600	900		
1	275	495	82	27,7	29,0	2,6	63
	275	495	80	27,7	29,0	–	66
	210	1900	62	18,0	28,3	1,0	88
	210	1900	47	18,0	28,3	–	86
2	128	330	90	27,4	31,6	–	70
	77	310	84	33,1	31,8	–	75
	1850	2100	58	6,0	30,5	–	82
	1850	2100	36	6,0	30,5	–	100
3	490	680	96	28,0	27,8	–	58
	490	680	100	28,0	27,8	3,3	61
	190	2900	46	27,5	29,5	–	89
	190	2900	45	27,5	29,5	1,0	91

Отмеченные закономерности структуры окатышей объясняют характер связи прочности при сжатии с температурой и режимом термообработки. Низкие (порядка 1000 Н/окатыш) значения прочности быстро нагретых окатышей, обожженных при 1200 и 1250 °С, объясняются развитием трещин на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки. С ростом температуры обжига гематит в оболочке диссоциирует, образуя магнетитошлаковое кольцо на поверхности. При охлаждении напряжения, возникающие на границе магнетитового ядра и гематитового слоя, компенсируются напряжениями обратного знака на границе магнетитового кольца и гематитового слоя. Снятие напряжений приводит к отсутствию трещин и упрочнению интенсивно нагретых окатышей, обожженных при высоких температурах (1320, 1350 °С).

Прочность предварительно окисленных неофлюсованных окатышей, обожженных в окислительной атмосфере, оказалась высокой во всем изученном интервале температур (~3000 Н/окатыш) вследствие однородности структуры. Формирование диссоциированного слоя при обжиге в слабо окислительных условиях незначительно ухудшает прочность окатышей с ростом температуры.

Офлюсованные окатыши окислительного режима 3 при 1200 и 1250 °С менее прочны, чем неофлюсованные, из-за большой пористости, образующейся при диссоциации известняка. Однако обильное шлакообра-

зование в ходе диссоциации гематита при 1320 и 1350 °С вследствие жидкофазного спекания уплотняет структуру. Однородный характер диссоциации и высокая прочность придают окисленным высокотемпературным окатышам с известняком высокую прочность (более 4000 Н/окатыш).

Таким образом, во всем изученном интервале температур наиболее прочными получились неофлюсованные предварительно окисленные окатыши (режимы 1 и 3). Не сильно отличаются от них окисленные офлюсованные окатыши режима 3. Наименее прочными оказались офлюсованные окатыши, интенсивно нагретые и окисленные после обжига в слабоокислительной среде.

Исследования по изучению поведения неофлюсованных окатышей в процессе восстановления, выполненные с помощью дериватографа и dilatометрической приставки к нему, показали, что для всех изученных режимов и температур ход кривых идентичен. Во всех случаях наблюдается период сравнительно резкого увеличения скорости в начале восстановления, затем процесс переходит в изокINETическую область с неизменной скоростью. При температурах выше 1000 °С отмечается участок подъема скорости восстановления. При этом степени восстановления превышают 50 %, что указывает на появление металлического железа. Начальный участок подъема скорости восстановления сопряжен с интенсивным разбуханием, связанным с переходом гематита в магнетит. В окатышах, обожженных при высокой температуре, где содержание монооксида железа достигает 15–17 %, а количество гематита – 30–40 %, разбухания практически нет. После участка разбухания для окатышей, содержащих гематит, наблюдается незначительное спекание, которое несколько затормаживается в период появления первых включений железа.

Особенность неофлюсованных окатышей всех режимов и температур обжига состоит в их сравнительно низкой восстановимости. Сопоставление их склонности к восстановлению проведено по степени восстановления, достигаемой при нагреве окатышей до 1100 °С ( $V_{1100}$ ). Связь  $V_{1100}$  с содержанием монооксида железа для исследуемых режимов показана на рис. 1.9, 2. Из него видно, что даже степень восстановления при 1100 °С полностью окисленных окатышей (режим 3) не превышает 60 %. При одном и том же содержании FeO лучше восстанавливаются окатыши режимов 1 и 2, обожженные при высоких температурах.

На рис. 1.10, в показана связь максимального разбухания со временем достижения степени восстановления 35 % для неофлюсованных окатышей.

Разбухание уменьшается с ростом  $\tau_{35}$ , т. е. со снижением восстано-

вимости. Причем лучшей восстановимостью при одной и той же величине разбухания обладают предварительно окисленные окатыши режима 1 после обжига в слабоокислительной среде.

Зависимость прочности после восстановления при 600 °С от содержания FeO (рис. 1.9, *д*) носит экстремальный характер. Окатыши, обожженные при сравнительно низких температурах (1200 °С), прочнее после восстановления, чем содержащие больше FeO и обожженные при 1250 и 1320 °С. Однако дальнейшее увеличение температуры и содержания FeO до 16–18 % приводит к повышению прочности (рис. 1.9, кривая *1*). Это связано с очень низкой восстановимостью таких окатышей (рис. 1.9, кривые *1* и *2*). Отметим, что при одинаковой восстановимости окатыши режима *1* наиболее прочные.

Анализ кривых изменения степени и скорости восстановления с изменением температуры при неизотермическом нагреве офлюсованных окатышей, а также кинетических кривых изменения размера и скорости изменения размера позволил установить резкое различие в восстановимости окатышей, обожженных при низких и высоких температурах. Окисленные окатыши режима *3*, обожженные при 1200 и 1250 °С, восстанавливаются при 1100 °С почти полностью, в то время как обожженные при 1320 и 1350 °С – только на 40–50 %. Сопоставление восстановления при разных режимах показывает, что увеличение содержания FeO сверх 10 % приводит к очень сильному уменьшению степени восстановления (рис. 1.9, *а*, кривые *1–3*). При этом также снижается и разбухание (рис. 1.9, *в*, прямые *2* и *3*, рис. 1.10, *а*, прямые *2* и *3*). При одном и том же содержании FeO лучшей восстановимостью обладают интенсивно нагретые окатыши (режим *2*), а худшей – окисленные по режиму *3* (рис. 1.9, *а*, кривые *1–3*). Четкой корреляции между прочностью после восстановления при 600 °С и составом окатышей не выявлено.

Анализ характера разрушения неофлюсованных окатышей, обожженных и охлажденных на воздухе, выполненный с помощью минералогических исследований, позволил установить наличие в них трещин между восстановленной и невосстановленной зонами. В офлюсованных окатышах трещины проявляются в меньшей степени. Обжиг и охлаждение в атмосфере гелия связаны с появлением магнетитовой оболочки в исходных окатышах. Такие окатыши восстанавливаются без трещин.

Изучение структурно-фазовых превращений при восстановлении показало, что рост температуры обжига, вызывающий диссоциацию гематита до магнетита, снижает разбухание в режиме неизотермического восстановления и восстановимость окатышей. Наиболее активное снижение восстановимости отмечается при содержании FeO больше 16 %.



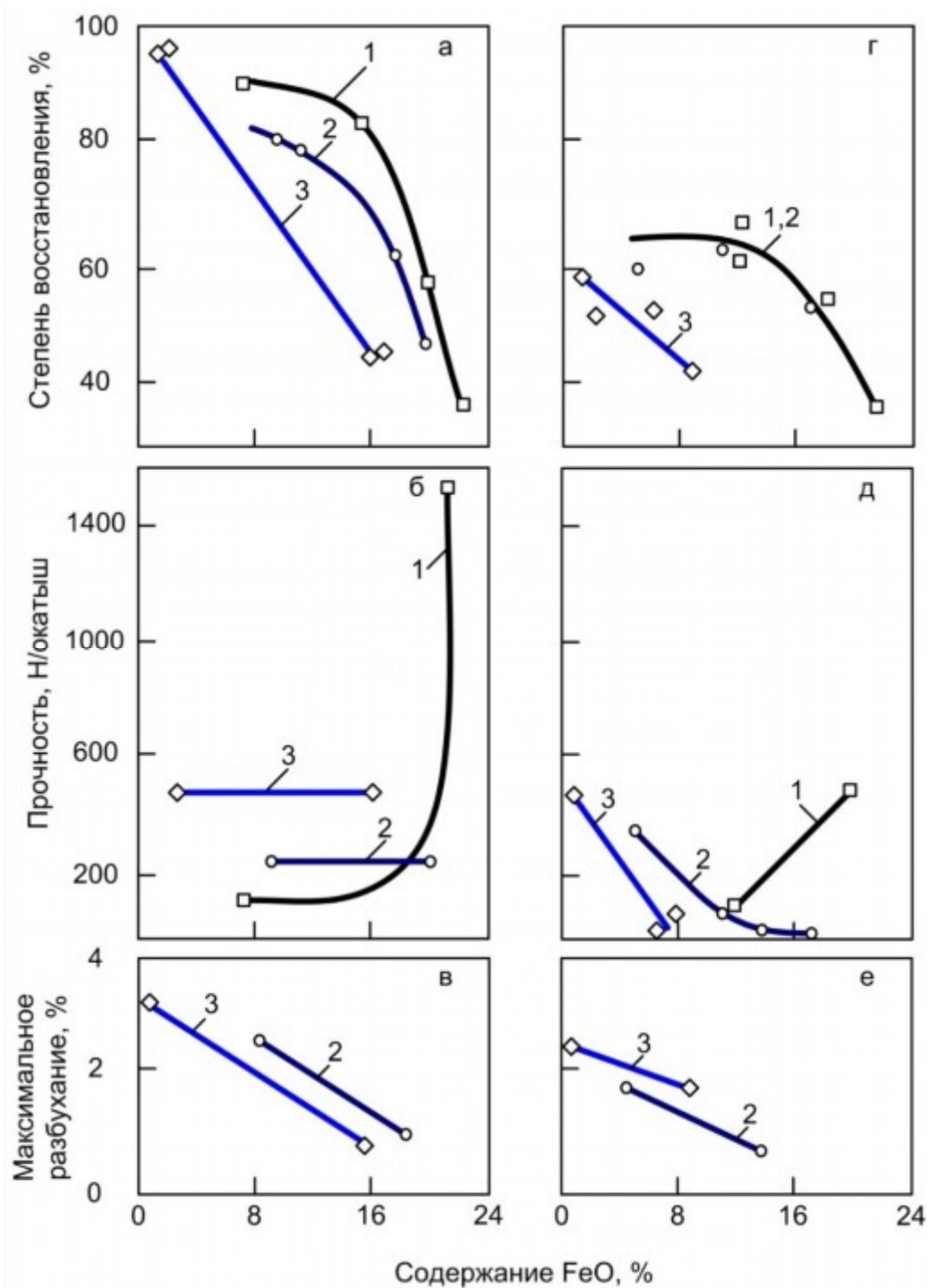


Рис. 1.9. Зависимости степени восстановления при 1100 °С (а, г), прочности окатышей после восстановления при 600 °С (б, д) и максимального разбухания (в, е) офлюсованных (а, б, в) и неофлюсованных (г, д, е) окатышей от содержания в них монооксида железа: 1 – режим обжига 2; 2 – режим обжига 1; 3 – режим обжига 3

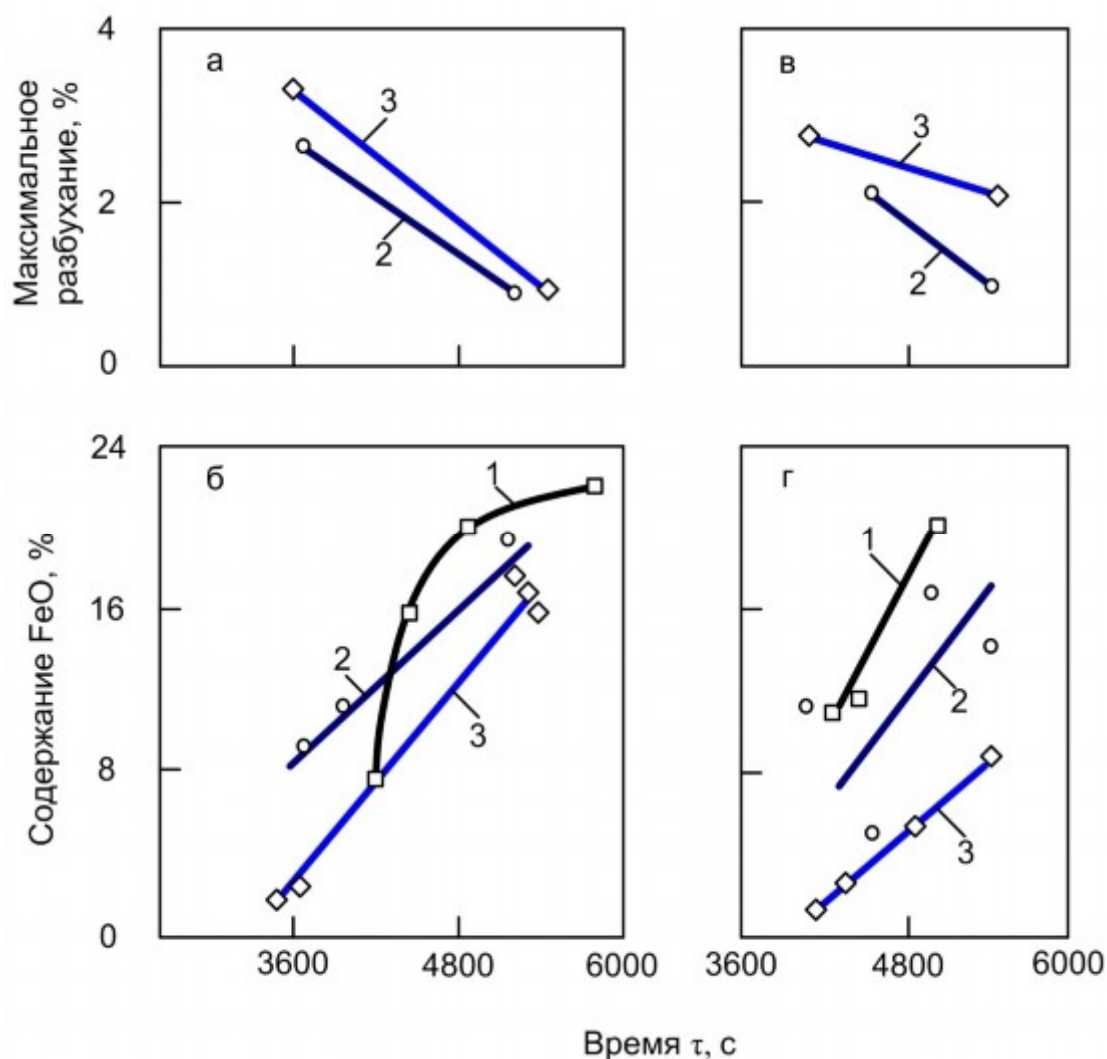


Рис. 1.10 Зависимость максимального разбухания (а, в) и содержания монооксида железа (б, г) в обожженных офлюсованных (а, б) и неофлюсованных (в, г) окатышах от продолжительности достижения степени восстановления 35 %:  
1 – режим обжига 2; 2 – режим обжига 1; 3 – режим обжига 3

Четкой корреляции между прочностью после изотермического восстановления при температуре 600 °С и разбуханием в режиме неизотермического нагрева не выявлено. Окатыши режима 1 (окисленные и обожженные в слабоокислительной среде) обладают лучшими прочностными свойствами после восстановления при одинаковой его степени.

Неофлюсованные окатыши, обожженные при температуре ниже 1300 °С, обладают сравнительно высокой прочностью после восстановления (400–500 Н/окатыш). Повышать температуру их обжига нельзя, т. к. это вызовет резкое снижение восстановимости и прочности после изотермического восстановления.

Эти явления можно объяснить тем, что в офлюсованных и неофлюсованных окатышах с высоким содержанием FeO шлаковая связка представляет собой железосиликатное или кальций-железосиликатное стекло. Как следует из минералогического анализа, такая связка начинает восстанавливаться только при температурах выше 800 °С. Пониженная восстановимость шлака в режиме неизотермического нагрева приводит к тому, что окатыши успевают прогреваться до 700–800 °С, практически не восстановившись. Восстановление гематита до магнетита в этой температурной области сопряжено с меньшими объемными изменениями, т. к. повышенная подвижность вакансий снижает возможность их коагуляции в виде пор. Наблюдаемое снижение восстановимости и разбухания связано с меньшим растрескиванием шлака, контактирующего со слаборазбухающими рудными зернами.

Таким образом, эффект упрочнения в ходе восстановления связан с формированием при обжиге слабовосстановимого шлака, застывающего преимущественно в виде стекла. В неофлюсованных окатышах он образуется при 1250–1300 °С за счет минералов кислой пустой породы. Эти окатыши слабовосстановимы и мало разбухают в режиме неизотермического нагрева. Подъем температуры не сильно меняет состав и количество шлака до момента начала интенсивной диссоциации гематита (при температурах выше 1350 °С). Это приводит к слабому влиянию температуры обжига на свойства при восстановлении.

В офлюсованных окатышах в отсутствие магнетита формируется легковосстановимый ферритный шлак. Эти окатыши, обожженные при низких температурах, хорошо восстанавливаются, но сильно разбухают. Появление магнетита вызывает обильное шлакообразование и остекловывание расплава при охлаждении. Окатыши теряют восстановимость, но сохраняют прочность.

Описанные закономерности по влиянию структуры окатышей на их поведение при восстановлении справедливы для неизотермического нагрева. В реальных промышленных агрегатах процесс неизотермический, поэтому для выбора оптимальных режимов обжига будем пользоваться величиной максимального разбухания при неизотермическом восстановлении.

По результатам проведенной работы разработан ряд рекомендаций по осуществлению оптимальных режимов с использованием слабоокислительной атмосферы в зоне обжига конвейерной машины КГОКа. Обжиг целесообразно вести при максимальных температурах 1250–1400 °С сначала в окислительной атмосфере до тех пор, пока температура в середине нижней половины слоя не поднимется до температуры начала диссоциации гематита. Затем окатыши обжигают в слабоокислительной атмосфере с содержанием кислорода 0,1–2,0 %, охлаждают в той же атмосфере до 800–900 °С, потом в неконтролируемой. Предлагаемый способ позволяет

окислить и упрочнить окатыши, а также достичь требуемой степени диссоциации для обеспечения высоких прочностных свойств при восстановлении.

Окатыши, полученные по рекомендуемым режимам, обладают оптимальным сочетанием прочностных свойств и восстановимости, позволяющими осуществлять их металлизацию до степени 70–75 % без нарушения работы шахтных печей.

#### 1.4. Разработка способов получения прочных окатышей при восстановлении

Изложенная ранее концепция [17] определяющего влияния характера распределения шлаковой связки, ее стеклуемости и восстановимости на разрушение окускованных железорудных материалов позволила выявить благоприятный состав силикатного расплава. В частности, для получения прочных при восстановлении полностью офлюсованных окатышей из низкокремнистых концентратов необходимо сформировать в их структуре основные связки, содержащие двухвалентное железо. Этого можно добиться и за счет термической диссоциации гематита.

Вопросы определения степени диссоциации гематита, влияния температуры, различных примесей, а также образования твердых и жидких растворов на термодинамику этой реакции подробно рассмотрены в работе [9].

В реальных системах степень диссоциации гематита определяется исходя из химического состава компонентов шихты и их содержания в смеси, подаваемой на окомкование. Значение степени диссоциации  $\alpha$ , % можно определить по формуле

$$\alpha = \frac{(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{дис}}}{(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{исх}}} 100, \quad (1.6)$$

где  $(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{дис}}$  и  $(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{исх}}$  – количество продиссоциированного и исходного гематита, г.

Допуская, что основная часть железа в концентрате связана с магнетитом, который окисляясь, переходит в гематит, получим

$$(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{исх}} = \frac{C_{\text{к}}}{100} \frac{\text{Fe}_{\text{общ.к}}}{100} 1,43P_0, \quad (1.7)$$

где  $C_{\text{к}}$  – содержание концентрата в шихте, %;

$\text{Fe}_{\text{общ.к}}$  – содержание железа в концентрате, %;

1,43 – коэффициент, учитывающий содержание железа в чистом магнетите и окисление магнетита до гематита;

$P_0$  – масса навески исходной шихты, г.

Количество продиссоциировавшего гематита рассчитывают по содержанию монооксида железа в обожженных окатышах, полагая, что весь он был связан с вторичным магнетитом независимо от его последующего распределения между рудной и шлаковой частями окатыша, т. е.

$$(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{дис}} = \frac{(\text{FeO})}{100} 3,34 P_1, \quad (1.8)$$

где  $(\text{FeO})$  – содержание монооксида железа в обожженных окатышах, %;

3,34 – коэффициент, учитывающий его содержание в магнетите и пересчет содержания последнего на соответствующее количество продиссоциированного гематита;

$P_1$  – масса навески шихты после обжига, г.

В ходе обжига изменение массы шихты происходит за счет удаления летучих из всех компонентов и окисления магнетита. Учитывая это, связь между величинами  $P_0$  и  $P_1$  запишем в виде

$$P_1 = P_0 \left\{ 1 - \frac{C_k}{100} \frac{\Delta M_k}{100} - \frac{C_{\phi}}{100} \frac{\Delta M_{\phi}}{100} - \frac{C_b}{100} \frac{\Delta M_b}{100} + \frac{[(\text{FeO})_k - (\text{FeO})]}{100} \right\}, \quad (1.9)$$

где  $\Delta M_k$ ,  $\Delta M_{\phi}$  и  $\Delta M_b$  – потери массы при прокаливании концентрата, флюса и бентонита, г;

$C_{\phi}$  и  $C_b$  – содержание флюса и бентонита в шихте, %;

$(\text{FeO})_k$  – содержание монооксида железа в концентрате, %.

Подставляя выражения (1.7) и (1.9) в формулу (1.6), получим

$$\alpha = \frac{2,33(\text{FeO}) \left\{ 1 - \frac{C_k}{100} \frac{\Delta M_k}{100} - \frac{C_{\phi}}{100} \frac{\Delta M_{\phi}}{100} - \frac{C_b}{100} \frac{\Delta M_b}{100} + \frac{[(\text{FeO})_k - (\text{FeO})]}{100} \right\} 0,11}{\frac{C_k}{100} - \frac{\text{Fe}_{\text{общ.к}}}{100}} \quad (1.10)$$

Приведенные в работе [9] соображения по влиянию добавок, расплава и т. д. на диссоциацию гематита были проверены на примере шихт из качканарских титаномагнетитовых концентратов различной степени обогащения известняка, доломита и бентонита. Бентонит вводили в количестве 1 %.

Химический состав компонентов шихты приведен в табл. 1.9.

Гранулометрический состав компонентов шихты представлен в табл. 1.10. Опыты проводили с цилиндрическими брикетами диаметром и высотой 12 мм, полученными при давлении 1 ГПа, и исходной пористостью 32–

34 %. Степень их разупрочнения при восстановлении оценивали с помощью дилатометрической приставки к дериватографу ОД–102. Два брикета одновременно нагревали в потоке газа, состоящего из 33 % СО и 67 % СО<sub>2</sub> и приближающегося по составу к газу в верхних горизонтах доменной печи. В ходе опытов фиксировали изменение температуры  $t$ , размера  $\Delta l$  и скорости  $\dot{u}$  изменения размера от времени  $\tau$ . На рис. 1.11 приведены типичные дилатограммы образцов, обожженных при температурах 1220 °С (сплошные кривые) и 1350 °С (штриховые кривые).

Таблица 1.9

**Химический состав компонентов шихты**

Элемент	Содержание, %					
	К1	К2	К3	Известняк	Доломит	Бентонит
Fe	60,81	62,34	65,17	2,16	0,60	2,38
FeO	25,73	27,11	27,75	0,50	–	0,85
CaO	1,65	0,84	0,88	51,55	30,05	2,25
MgO	2,44	2,52	1,36	0,64	20,04	4,63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,44	2,42	2,42	0,67	0,47	18,41
SiO <sub>2</sub>	5,32	3,32	1,32	1,33	1,31	57,50
MnO	0,12	0,23	0,22	–	–	0,17
TiO <sub>2</sub>	2,34	2,68	2,72	–	–	–
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,55	0,66	0,65	–	–	–
S <sub>общ</sub>	0,008	0,004	0,004	–	–	–
P	0,001	0,004	0,004	–	–	0,06
ПМПП	1,04	0,89	0,61	41,66	45,60	9,03

Примечание. К1, К2 и К3 – разновидности качканарского концентрата.

Таблица 1.10

**Гранулометрический состав компонентов шихты**

Клас, мм	Содержание, %				
	К1	К2	К3	Известняк	Бентонит
+0,1	1,7	2,2	1,2	0,2	0,6
0,1–0,074	14,0	11,8	9,5	8,4	20,4
0,074–0,053	6,9	10,1	10,7	10,5	3,6
0,053–0,04	20,5	16,3	14,1	14,8	29,6
0,04–0,0	56,9	59,6	64,5	65,3	45,8

За показатель  $Q$  металлургической прочности принимали логарифм обратного отношения площадей  $q_i$  под кривыми разбухания при нагреве до 1000 °С к соответствующей принимаемой за эталон величине  $q_0$  для окисления брикетов основностью 1,3, обожженных при температуре 1300 °С:

$$Q = \lg(q_0/q_i). \quad (1.11)$$

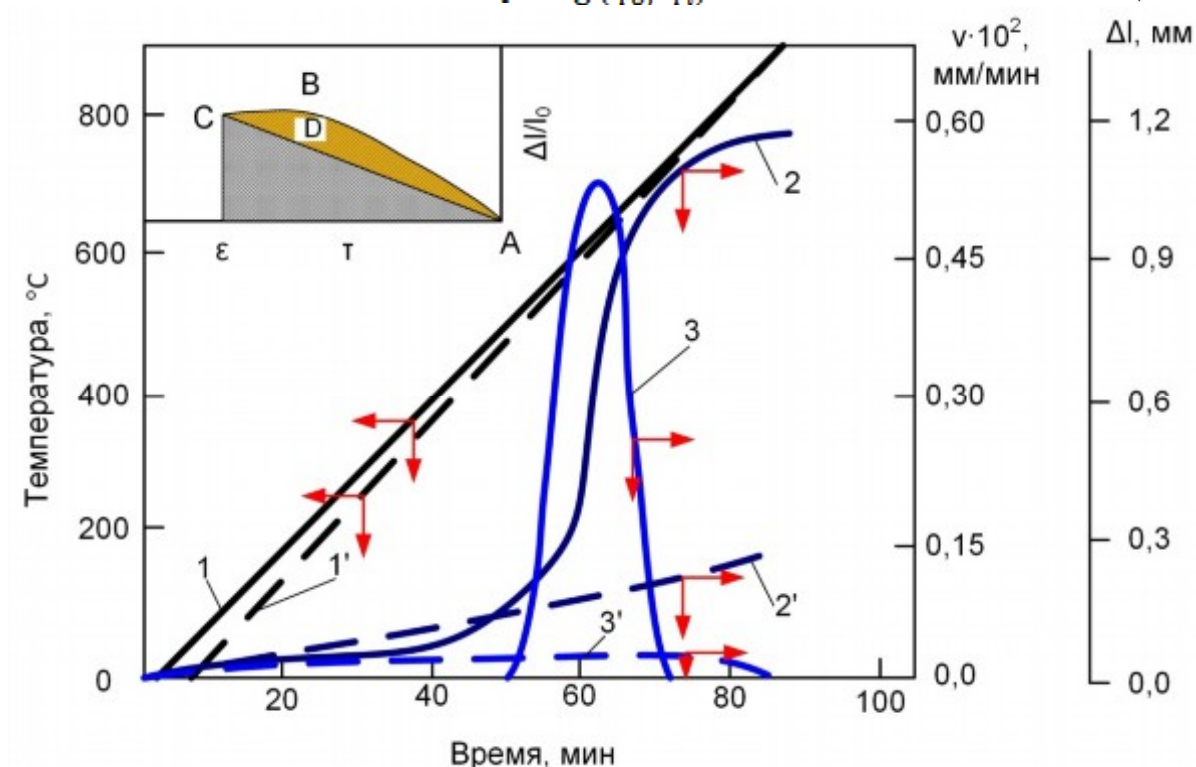


Рис. 1.11. Дилатогаммы офлюсованных окатышей из разновидности качканарского концентрата К1

Рудная часть эталонного образца в диапазоне температур 550–620 °С (рис. 1.11, сплошная кривая для параметра  $v$ ) полностью восстанавливалась до магнетита, а брикет самопроизвольно рассыпался. Если  $q_i \approx q_0$ , то  $Q \rightarrow 0$ , т. е. металлургическая прочность таких образцов ничтожно мала. В общем случае величина  $Q$  при постоянной скорости нагрева зависит не только от относительного изменения размера при температуре 1000 °С, но и от температурного интервала разбухания. При одинаковой величине  $\Delta l/l_0$  площадь  $q_i$  под кривой разбухания тем больше, а величина  $Q$  тем меньше, чем ниже температурный интервал разбухания (см. площади под кривыми  $ABCE$  и  $ADCE$  на рис. 1.11). Поскольку количество образующейся при восстановлении мелочи пропорционально увеличению размера окатышей при восстановлении [18], а доля вынесенной пыли через колошники зависит от горизонта печи, на котором происходит разрушение, т. е. от температурного интервала, то следует ожидать связи показателя  $Q$  с качеством окучкованного сырья. В частности, была обнаружена неплохая корреляция между значениями  $Q$  и выходом мелочи после восстановления во



вращающемся барабане, имитирующем условия в верхних горизонтах доменной печи (рис. 1.12).

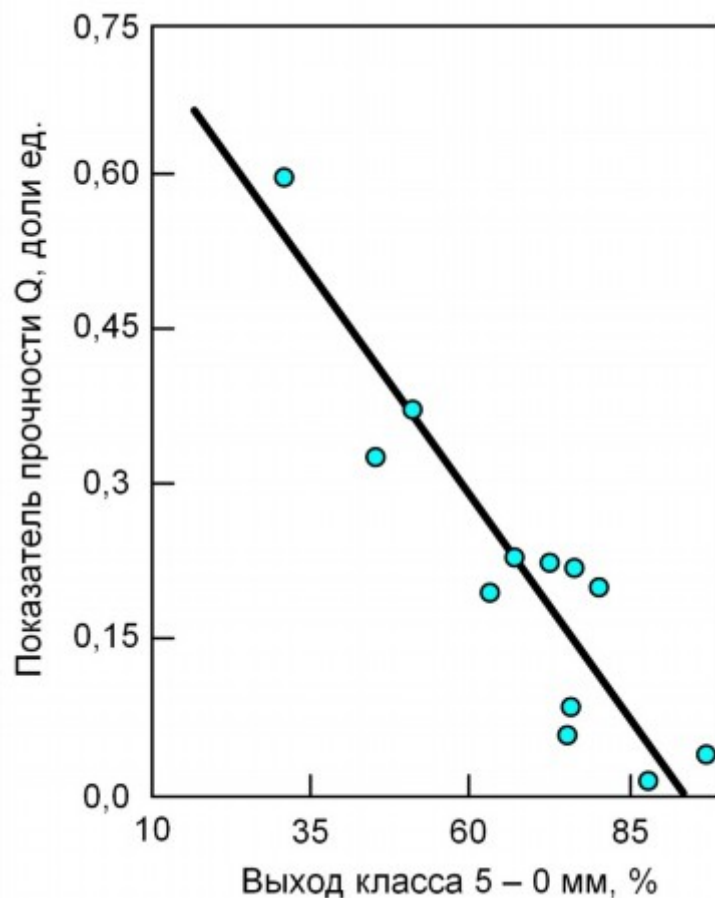


Рис. 1.12. Зависимость показателя  $Q$  качканарских окатышей от выхода класса 5–0 мм при динамических испытаниях по методу Линдера

Термическую обработку брикетов осуществляли в печи электрического сопротивления. Скорости нагрева и охлаждения составляли 100 °С/мин, а скорость фильтрации газа через слой была равной 15–20 см/с. В зоне температур 950–1150 °С брикеты выдерживали до полного окисления титаномагнетита [19], а затем обжигали при различных температурах в диапазоне 1200–1400 °С в течение 7 мин. Химическим анализом обожженных брикетов выявлено присутствие в них двухвалентного железа (табл. 1.9).

Его появление при полном предварительном окислении свидетельствует о диссоциации гематита по реакции (1.6). Связь степени диссоциации, рассчитанной по формуле (1.10), с температурой обжига  $t_{\text{обж}}$  показана на рис. 1.13.

Как и следовало ожидать, степень диссоциации увеличивается с ростом температуры.



Добавки в шихту брикетов соединений двухвалентных металлов, которые могут образовывать твердые растворы с магнетитом, должны привести к повышению упругости диссоциации и к снижению температуры устойчивости гематита [9]. Поэтому добавка родохрозита позволила достичь величины  $\alpha = 30\text{--}40\%$  при температуре  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 1.13, кривая 4).

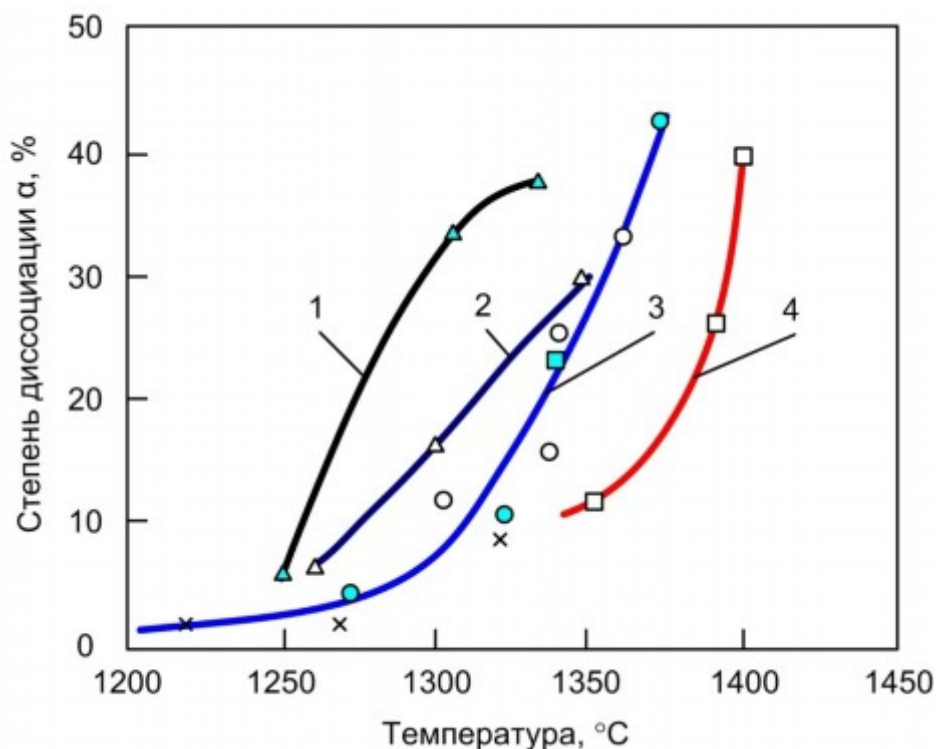


Рис. 1.13. Зависимость параметра  $\alpha$  в обожженных в течение 7 мин брикетах из качканарского концентрата от температуры обжига при величине  $\Sigma \text{O}$ , равной 12,0 (1), 13,5 (2), 12,5 (3) и 6,0 % (4)

Появление силикатного расплава также приведет к растворению в нем преимущественно магнетита [20] и понижению температуры начала диссоциации гематита. Сказанным объясняются высокие температуры  $1380\text{--}1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  начала протекания реакции диссоциации в окатышах из богатых концентратов, где сумма шлакообразующих оксидов равна 6 %. Увеличение количества шлака за счет оксидов кремния, кальция и алюминия пустой породы или добавок известнякового флюса приводит к интенсивному разложению гематита при температурах  $1300\text{--}1350\text{ }^{\circ}\text{C}$  (табл. 1.11, рис. 1.13, кривые 1, 2, 4).

Диссоциация гематита существенно отражается на структуре обогащенных гранул. Специальными опытами установлено различие в строении слабодиссоциированных окускованных железорудных продуктов и диссо-

цированных до степени 25–30 %. Характер восстановления последних определяется взаимодействием газа со шлаковыми связками, содержащими ионы  $\text{Fe}^{2+}$ .

Из результатов физико-химического анализа следует, что повысить металлургические свойства при восстановлении офлюсованных брикетов и окатышей из качканарских концентратов возможно путем образования при обжиге достаточного количества стекловатой связки, которая формируется при растворении магнетита в кальций-силикатном расплаве. Эта концепция подтверждается данными работы для малокремнистых (3–5 %  $\text{SiO}_2$ ) концентратов и литературными данными для высококремнистых (7–8 %  $\text{SiO}_2$ ) концентратов. Действительно, использование более богатых кремнеземом концентратов дает возможность при сравнительно низком содержании кальция ( $B = 0,5\text{--}0,7$ ) [21] или при очень быстром охлаждении (400–500 °C/мин) [22] предотвратить кристаллизацию расплава с выпадением легковосстановимых фаз на основе трехвалентного железа. При этом образуется трудновосстановимое стекло в практически полностью окисленных материалах. Температурный интервал восстановления окатышей сдвигается к области температур 800–900 °C [22], а их прочность сохраняется.

В качестве иллюстрации сказанного приведены измерения показателя металлургической прочности брикетов различной основности, полностью окисленных и обожженных при температурах 1200–1400 °C (рис. 1.14 и табл. 1.11).

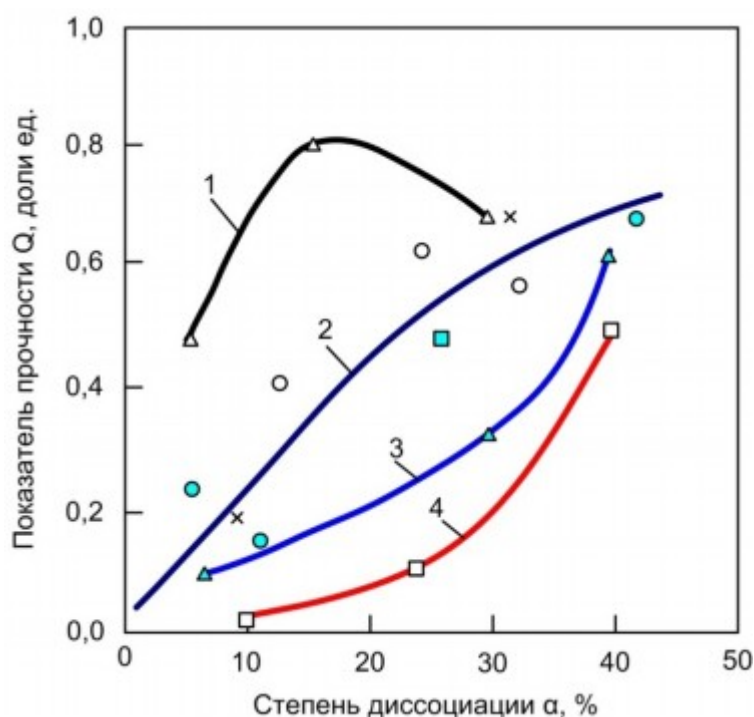


Рис. 1.14. Зависимость показателя  $Q$  от величины  $\alpha$  в обожженных в течение 7 мин брикетах из качканарского концентрата.

Величина  $\sum 0$  составляла 6,0 (1), 13,5 (2), 12,0 (3) и 12,5 (4)

Таблица 1.11

**Металлургические свойства брикетов из обожженных  
в электропечи качканарских концентратов**

Состав шихты		$t_{\text{обж}},$ °C	Содержание, %		Показатели			
концен- трат	флюс		Fe <sub>общ</sub>	FeO	$B$	$\sum O, \%$	$P, \%$	$Q$
K1	CaCO <sub>3</sub>	1220	51,51	0,42	0,87	12,96	6,50	0,08
K1	CaCO <sub>3</sub>	1270	57,07	0,60	0,79	12,77	6,30	0,09
K1	CaCO <sub>3</sub>	1320	57,36	2,27	0,81	12,83	6,00	0,22
K1	CaCO <sub>3</sub>	1350	57,43	7,68	0,84	12,93	1,70	0,68
K1	CaCO <sub>3</sub>	1350	56,47	5,33	1,15	13,70	–	0,47
K2	CaCO <sub>3</sub>	1300	58,09	3,11	1,09	12,26	4,00	0,40
K2	CaCO <sub>3</sub>	1320	58,68	3,22	1,09	12,26	7,20	0,10
K2	CaCO <sub>3</sub>	1340	58,09	6,84	1,10	12,28	2,00	0,60
K2	CaCO <sub>3</sub>	1360	58,09	8,58	1,09	12,27	1,70	0,56
K2	CaCO <sub>3</sub>	1260	56,77	1,18	1,58	13,48	6,50	0,46
K2	CaCO <sub>3</sub>	1300	57,50	4,44	1,58	13,48	1,60	0,82
K2	CaCO <sub>3</sub>	1350	58,08	7,15	1,58	13,48	3,00	0,67
K2	CaCO <sub>3</sub>	1350	61,91	1,37	0,73	6,11	10,00	0,00
K2	CaCO <sub>3</sub>	1390	62,20	6,21	0,73	6,11	7,30	0,10
K2	CaCO <sub>3</sub>	1400	61,91	10,81	0,81	6,11	2,00	0,48
K1	Доломит	1270	57,51	0,73	–	12,26	7,80	0,23
K1	Доломит	1320	57,43	2,66	–	12,42	5,60	0,12
K1	Доломит	1370	57,80	11,12	–	12,61	2,20	0,67
K2	CaCO <sub>3</sub> + MnCO <sub>3</sub>	1250	56,74	0,68	1,03	11,89	2,70	0,08
K2	CaCO <sub>3</sub> + MnCO <sub>3</sub>	1300	56,10	8,07	1,04	12,19	3,10	0,36
K2	CaCO <sub>3</sub> + MnCO <sub>3</sub>	1330	56,61	10,18	1,07	12,13	1,90	0,62

*Примечание.*  $B$  – основность обожженных брикетов;  $\sum O$  – сумма шлакообразующих оксидов в обожженных брикетах;  $P$  – разбухание при восстановлении до 900 °C;  
 $Q$  – показатель прочности.

Увеличение степени диссоциации гематита и, следовательно, содержания магнетита во всех случаях приводило к росту металлургической прочности. Однако содержание магнетита для образования необходимого количества расплава зависит от суммы шлакообразующих оксидов и температуры обжига. Так, при  $\sum O = 12,0 - 13,5 \%$  показатель  $Q$  остается неизменным при  $\alpha \geq 20 - 25 \%$ , а брикеты практически не разбухают после восстановления (рис. 1.14, кривые 1, 2 и табл. 1.11). Это указывает на достаточно полное экранирование рудных зерен, если в структуре окускован-

ных материалов содержится 18–20 % магнетита. В офлюсованных образцах из богатых титаномагнетитовых концентратов, где  $\sum O = 6\%$ , достичь высоких значений  $Q$  удастся только при замене половины гематита на магнетит (рис. 1.14, кривая 3).

При обжиге брикетов с добавкой соединений марганца снижается температура начала диссоциации [23]. Поэтому при  $\sum O = 12\%$  в них образуется 18–20 % магнетита при температуре 1280–1300 °С. Вследствие малого количества расплава при этих температурах и неполного экранирования гематита металлургическая прочность окатышей несколько ниже, чем в образцах без соединений с марганцем, но с теми же значениями суммы шлакообразующих и степени диссоциации и обожженных при температуре 1350 °С (рис. 1.14, кривые 1, 4). Однако брикеты, диссоциированные до значения  $\alpha = 20 - 25\%$  при температуре 1300 °С более прочны при восстановлении, чем обожженные при той же температуре, но с меньшей степенью диссоциации ( $\alpha = 5 - 7\%$ ).

Таким образом, чтобы повысить металлургические свойства при восстановлении окускованных продуктов из качканарского концентрата, не снижая содержания железа, необходимо предварительно окислить образцы в интервале температур 950–1150 °С, а затем подвергнуть их обжигу при температуре 1300–1375 °С. Это обеспечит степень диссоциации гематита не менее 25 % [24]. При плавке таких окатышей в доменной печи снижение выхода мелочи по классу 5–0 мм (ГОСТ 19575–74) составит в среднем 5 % (получено расчетом), что приведет к уменьшению расхода кокса на 0,59 % и увеличению производительности доменной печи на 1,37 %.

Следовательно, обязательным условием получения слаборазрушающихся при восстановлении офлюсованных окускованных материалов из концентратов с низким (2–4 %) содержанием кремнезема является наличие в обожженных образцах 6–8 % монооксида железа. При этом шлаковая связка в них содержит преимущественно железо-кальций-силикатное стекло, экранирующее рудные зерна от непосредственного контакта с восстановительным газом. Рекомендовано на Качканарском горно-обогатительном комбинате получать окатыши со степенью диссоциации не менее 25 % при температуре 1300–1375 °С. Использование таких окатышей в доменном переделе вместо обожженных в режиме интенсивного нагрева приведет к повышению технико-экономических показателей работы доменных печей.

### 1.5. Совершенствование режимов обжига окатышей Качканарского ГОКа

На фабрике по производству окатышей Качканарского ГОКа (КГО-Ка) производят офлюсованные титаномагнетитовые окатыши основностью  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,25$  по проектной технологии. Окислительный обжиг тугоплавких окатышей при 1150–1300 °С не обеспечивает образования достаточного количества жидкой фазы, поэтому окатыши получают с высокой открытой пористостью (27–30 %). В верхней половине шахты доменной печи при 600–700 °С гематит восстанавливается, что приводит к существенному разупрочнению окатышей. В результате эффективность применения этого вида сырья снижается.

С целью обеспечения высокотемпературной обработки нижних слоев окатышей на обжиговых тележках фабрику перевели вначале на производство окатышей с добавкой 0,5 % углерода твердого топлива (ТТ), а затем испытали технологию обжига [24] с частичной диссоциацией гематита (ЧДГ) при увеличении расхода природного газа от 45,2 до 47,4 м<sup>3</sup>/т окатышей. В качестве контрольного (первый этап исследований) использовали наиболее отработанный режим обжига с интенсивным нагревом, при котором температура продуктов сгорания во всех отапливаемых секциях после зоны сушки находилась на уровне 1300 °С (табл. 1.12). В зоне рекуперации горелки не работали, и температура в горне поднималась до 1000 °С вследствие перетока горячих газов из зоны охлаждения.

Таблица 1.12

**Параметры работы обжиговых конвейерных машин в разные этапы исследований (1, 2, 3)**

Параметр	Этап исследования		
	1	2	3
Расход газа, м <sup>3</sup> /т	45,2	38,7	47,4
Производительность по сырым окатышам, т/ч	101,7	93,7	101,6
Температура, °С, в горне по секциям:			
III (зона сушки)	517	564	460
IV (зона подогрева)	1270	1322	1063
IVa (зона обжига)	1335	1314	1207
V (зона обжига)	1236	1269	1387
VI (зона рекуперации)	1000	1000	1313
Температура на границе слой–постель над вакуум–камерой № 16 (первая камера в зоне охлаждения I), °С	1160	1232	1200
Температура в вакуум–камере № 21 (последняя камера в зоне охлаждения), °С	366	405	417

*Примечание.* Расход твердого топлива на втором этапе составил 6 кг/т; высота слоя (без постели) на всех этапах 500 мм.

На втором этапе исследований дробление и измельчение угля производили совместно с известняком в соотношении 1:7 вначале в конусных дробилках, а затем в шаровых мельницах. Дозирование компонентов шихты вели в обычном порядке на заданную основность окатышей с учетом золы, вносимой топливом. Ввод твердого топлива в количестве 6 кг/т окатышей позволил без изменения температуры в горне повысить температуру на границе слой – постель от 1160 до 1232 °С.

На первом и втором этапах исследований обжиговые конвейерные машины работали с газогорелочными устройствами (ГГУ) для сжигания газа в слое. Перед проведением третьего этапа исследований они были демонтированы на машине № 3 из-за существенного снижения эффективности их применения после увеличения высоты слоя в последующие периоды работы фабрики.

При производстве окатышей с ЧДГ, согласно данным [24], предусматривали полное окисление исходного магнетита снижением температуры от 1270–1340 до 1060–1200 °С и увеличением продолжительности тепловой обработки от 6 до 14 мин в зоне подогрева, а для сохранения длительности обжига в зоне рекуперации включали в работу горелки. При этом повысили температуру в зоне обжига до 1380 °С и вакуум-камере № 21 от 366–405 до 417 °С.

В работе [25] изучались свойства окатышей с введением твердого топлива и частичной диссоциацией гематита в исходном состоянии и после восстановления в лабораторных условиях. Для этого усредненные пробы окатышей отбирали с охладителя обжиговой машины. Опыты заканчивали остановкой одной из машин и снятием с конвейера обжиговой тележки. Окатыши на паллете анализировали в трех горизонтальных и вертикальных участках. Донную и бортовую постели в анализе не учитывали.

На всех этапах исследований наибольшее содержание монооксида железа FeO окатыши имели в верхней части слоя (рис. 1.15). При интенсивном нагреве начатое в зоне сушки окисление поверхности окатышей в верхней части слоя прекращалось, когда они поступали в зону подогрева с высокой температурой, в результате интенсивного спекания при появлении расплава. Следовательно, повышение содержания FeO здесь вызвано недоокислением магнетита концентрата. Развивающиеся на контакте магнетитового ядра и гематитовой оболочки трещины приводят к снижению

показателя  $B_{>5}$ . Окатыши при испытании на стандартном барабане и при

перегрузках разрушаются, при этом оболочка отделяется от ядра, не образуя мелких частиц, поэтому критерий  $B_{<0,5}$  небольшой.

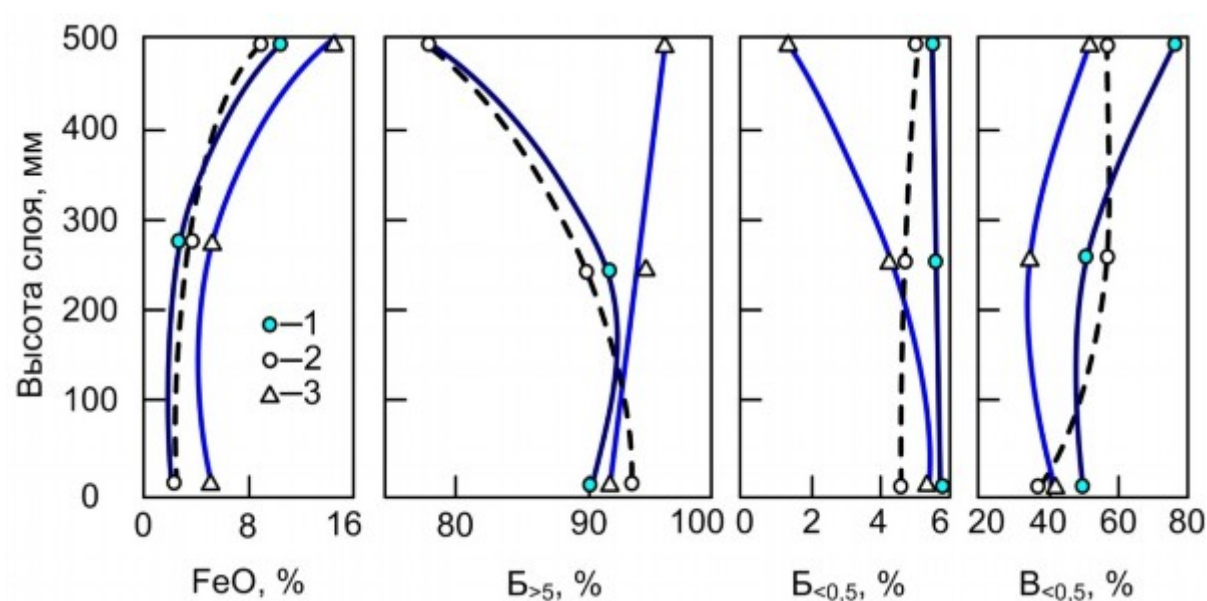


Рис. 1.15 Изменение содержания FeO и прочности по высоте слоя окатышей:

1–3 – этапы исследований;  $B_{>5}$ ,  $B_{<0,5}$  – при испытании в стандартном барабане

по выходу класса  $>5$  мм и  $<0,5$  мм (ГОСТ 15137–77);

$B_{<0,5}$  – то же после восстановления (ГОСТ 19575–74)

В нижних горизонтах слоя окатыши успевают окислиться в большей мере и упрочняются в результате твердофазного спекания. Равномерная

структура окатышей обеспечивает удовлетворительные прочностные характеристики в исходном состоянии.

На третьем этапе исследований более длительная обработка слоя при сравнительно низких температурах в зонах сушки и подогрева позволила наиболее полно окислить магнетит концентрата, а поступление окатышей в зону обжига с повышенной температурой обеспечило протекание реак-

ции  $3\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 0,5\text{O}_2$  в диапазоне 1200–1370 °С в зернах, контакти-

рующих с расплавом. Диссоциация протекала по всему сечению окатыша на большей части слоя, о чем свидетельствуют высокие температуры по высоте паллеты (табл. 1.13).

Таблица 1.13

**Распределение температур по высоте слоя окатышей  
на разных этапах исследований (1, 2, 3)**

Высота слоя от поверхности засыпи, мм	Этап исследования		
	1	2	3
0	1300	1320	1370
200	1300	1314	1370
300	1250	1270	1320
500	1170	1232	1200

Упрочнение окатышей происходило благодаря жидкофазному спе-

канию и сохранению равномерной структуры, поэтому показатели  $B_{>5}$

и  $B_{<0,5}$  оказались лучше, чем на первом этапе.

Установленные закономерности изменения прочности окатышей в холодном состоянии сохранились и после восстановления по ГОСТ 19575–74. Введение твердого топлива в окатыши позволило улучшить прочностные характеристики на границе слой – постель, но этого оказалось недостаточно для улучшения качества продукта в целом (табл. 1.14) без изменений режима обжига.

Таблица 1.14

**Химический состав и прочностные характеристики товарных окатышей**



Этап исследования	Содержание, %					
	Fe	FeO	Б <sub>&gt;5</sub>	Б <sub>&lt;0,5</sub>	В <sub>&lt;0,5</sub> <sup>*</sup>	Фракция 5–0, мм
1	58,8	3,2	89,6	6,5	57,5	3,0
2	58,7	4,9	88,6	5,0	47,5	3,9
3	59,0	2,7	90,2	6,1	52,8	2,5

\*По ГОСТ 19575–74

Проплавления окатыши на доменных печах № 1, 2 и 5 полезным объемом 1242, 1242 и 1791 м<sup>3</sup> в два этапа. На этапе 1 у всех печей был обычный профиль, а на этапе 2 в печах № 1 и 5 верхняя часть шахты имела переменный угол наклона [24, 25]. Отрабатывалась технология плавки с обогащением дутья кислородом. В ходе опытов исследовали 4 периода: 1–2 (этап 1) и 3–4 (этап 2).

Изменение температуры, отбор проб газа и материалов осуществляли в периоды 1 и 4 на печи № 1, а в период 2 – на печи № 2 с горизонта, удаленного на 2 м от поверхности засыпи. Определяли качество отдельных

компонентов шихты крупностью >5 мм. Класс 5–0 мм сортировали по

магнитной проницаемости. Немагнитную часть пробы, преимущественно состоящую из частиц кокса, не учитывали. Окатыши делили на целые и колотые. Прочность на сжатие определяли испытанием 60 окатышей на разрывной машине МР–0,5 М, рекомендованной ГОСТ 24765–81.

Химическому анализу подвергали отдельно каждый компонент руд-

ной части шихты фракции >10 мм, 10–5 и 5–0 мм. Средний состав опреде-

ляли суммированием результатов анализа всех анализируемых фракций пропорционально их содержанию в пробе. Степень восстановления рудных материалов определяли по количеству отнятого кислорода на основе химических анализов исходных и извлеченных из печи материалов. Среднюю величину степени восстановления для горизонта в целом подсчитывали с учетом площадей кольцевых сечений, в которых отбирали пробы.

На распределение температуры и состава газа по радиусу печи влияют распределение материалов на колошнике, восстановимость окатышей и дутьевой режим. Материалы в печь загружали во всех периодах по системе РРКК (Р – рудная часть шихты, К – кокс) с уровнем засыпи (расстояние от кромки большого конуса в опущенном состоянии до поверхности засыпи) 1,50–1,75 м. В период 2 масса рудной подачи была меньше (20 т против 23 т в периоды 1 и 4), поэтому рудные материалы ложились ближе к стенке колошника. Из-за повышенной восстановимости окатышей с твердым топливом, вызванной увеличением пористости, процесс восстановления оксида железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  протекал интенсивнее с ростом температуры газа на исследуемом горизонте (рис. 1.16). По этой же причине увеличилась температура колошникового газа от 229 до 244 °С, а степень использования оксида углерода  $\eta_{\text{CO}}$  снизилась от 45,4 до 44,2 %.

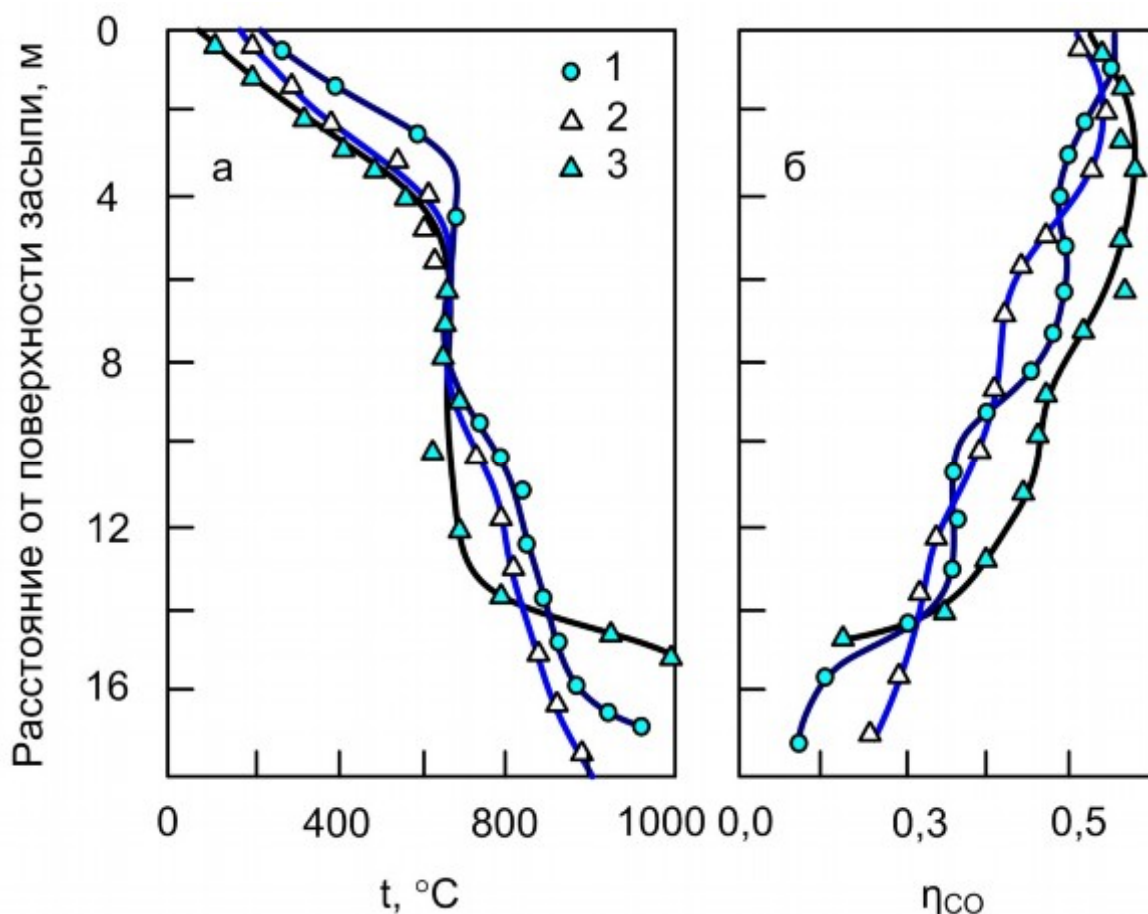


Рис. 1.16. Изменение температуры газа (а) и степени использования оксида углерода (б) по высоте печи:  
1–3 – этапы исследований

Для повышения извлечения ванадия в конвертерном производстве требуется меньшее содержание в чугуна кремния, титана и марганца, поэтому доменную плавку следует вести при низких температурах газа, смещая процессы восстановления сырья в нижние горизонты. В этих условиях очевидно преимущество плавки с повышенной долей окатышей и частичной диссоциацией гематита в сравнении с плавкой агломерата и окатышей с агломератовидной структурой.

Эффективность применения окатышей выявили на основе сопоставления показателей работы доменных печей в контрольные периоды 1 и 3, а также в опытные периоды 2 и 4 при плавке окатышей с ТТ и ЧДГ. В периоды 1 и 3 проплавливали окатыши, обожженные при температурно-тепловом режиме, характерном для технологии интенсивного нагрева. В периоды 1 и 2 содержание окатышей в шихте печей № 1 и 5 поддерживали постоянным и равным 70 и 30 %, а на печи № 2 изменяли от 0 до 100 % в зависимости от поступления сырья с КГОКа. В периоды 3–4 в аналогичном режиме по обеспечению шихтовыми материалами находилась печь № 1. Основные технико-экономические показатели работы доменных печей в периоды 1–4 представлены в табл. 1.15.

Наилучшие показатели при плавке окатышей с ТТ были достигнуты на печи № 1, а наихудшие – на печи № 5. После приведения показателей в периоды 1 и 2 к одинаковым условиям оказалось, что производительность печей и удельный расход кокса изменились следующим образом, %:

Номер печи	1	2	5
Производительность	+2,2	-2,3	-5,2
Удельный расход кокса	0	-1,0	+1,6

Уменьшение класса >5 мм в сырье периодов 1 и 2 после опускания

на 2 м от поверхности засыпи возросло от 21,5 до 22,5 %, но поведение окатышей с ТТ было более предпочтительным в связи с меньшим их разрушением. Количество целых окатышей в период 2 возросло от 11 до 22 %. Этим можно объяснить улучшение показателей плавки на одинаковой по объему доменной печи № 1 с повышенной и постоянной долей окатышей в шихте. В то же время низкие прочностные свойства опытных окатышей на сжатие оказались недостаточными при использовании их на печи большего объема.

Таблица 1.15

**Технико-экономические показатели работы печей №№ 1, 2 и 5 с использованием в шихте окатышей окисленных,  
с введением твердого топлива и с частичной диссоциацией гематита в разные периоды**

Параметры работы	Доменная печь № 1				Доменная печь № 2				Доменная печь № 5			
	Номер периода											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Продолжительность периода, сут	15	21	24	31	21	21	22	30	9	14	23	31
Производительность, т/сут	2239	2297	2671	2745	2409	2348	2507	2543	3106	2974	3165	3362
Загружено в печь, т/сут:												
кокс сухой	1075	1098	1236	1236	1226	1194	1134	1091	1449	1479	1650	1695
рудная сыпь	3813	3935	4739	4828	4072	4094	4340	4310	5248	5233	5702	5921
Состав рудной сыпи, %:												
агломерат КГОКа	30,0	30,0	54,4	59,2	46,3	54,4	49,9	44,0	67,3	70,4	56,1	56,8
окатыши КГОКа	70,0	70,0	41,0	33,1	53,7	45,5	44,9	49,3	32,7	29,6	39,8	36,5
агломерат НТМК	—	—	4,6	7,7	—	—	5,2	6,7	2,4	—	4,1	6,7
Расход материалов, кг/т:												
рудная сыпь	1684	1690	1748	1720	1668	1703	1704	1669	1715	1703	1775	1735
ванадиевые отходы	33	45	42	38	32	45	36	43	25	37	52	48
кокс сухой	483	476	462	449	509	506	452	429	487	490	521	504
Расход природного газа, м³/т	94	93	102	98	103	104	100	101	81	86	107	107
Содержание железа в рудной сыпи, %	57,8	58,0	57,2	57,2	57,5	57,5	57,3	57,6	56,8	57,2	57,3	57,4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Дутье:												
температура, °С	1150	1150	1161	1159	1117	1110	1083	1085	1091	1100	1010	998
давление, кПа	254	249	236	225	236	240	216	225	262	272	252	263
содержание O <sub>2</sub> , %	21,2	21,1	26,4	25,4	21,0	21,0	24,4	23,6	21,3	21,2	24,3	24,3
влажность, г/м <sup>3</sup>	16,8	8,8	11,8	11,4	21,9	23,0	17,8	13,8	19,8	16,4	23,6	15,2
Колошниковый газ:												
давление, кПа	110	111	116	102	112	112	91	103	143	147	124	138
температура, °С	238	215	178	189	229	244	170	175	249	238	232	223
Содержание, %:												
CO <sub>2</sub>	17,3	17,9	19,4	19,3	17,5	16,9	19,1	19,5	17,4	17,5	17,9	17,9
CO	20,4	20,9	22,5	22,6	20,9	21,4	21,9	22,1	22,6	22,3	22,7	22,8
H <sub>2</sub>	6,54	6,13	6,88	6,70	6,08	6,25	7,18	7,10	6,35	6,51	6,81	6,45
Вынос колошниковой пыли, кг/т	21	20	27	25	21	22	30	25	14	11	22	21
Состав чугуна, %:												
Si	0,22	0,21	0,21	0,23	0,22	0,23	0,22	0,23	0,21	0,17	0,18	0,18
Mn	0,29	0,29	0,33	0,35	0,28	0,28	0,31	0,35	0,26	0,25	0,30	0,33
S	0,024	0,027	0,020	0,022	0,030	0,030	0,026	0,023	0,032	0,031	0,024	0,023
V	0,456	0,441	0,444	0,440	0,449	0,445	0,438	0,446	0,415	0,422	0,437	0,434
Ti	0,24	0,22	0,24	0,25	0,23	0,23	0,22	0,25	0,20	0,18	0,20	0,21
Степень извлечения ванадия, %	84,2	77,6	79,4	84,4	84,4	78,5	81,6	86,4	76,0	75,8	75,3	80,5

Боковая нагрузка  $Q_6$  на стену доменных печей № 1, 2 и 5 на расстоянии 2–3 м от поверхности засыпи, определенная по методике [26], составила, кПа:

Номер печи	1	2	5
Периоды:			
1–2	10,2	13,8	30,4
3–4	4,4	7,7	10,5

При опускании материалов с большого конуса в печь величина  $Q_6$  возрастала на 20–30 %. По-видимому, по этой причине увеличилось разрушение опытных окатышей с ТТ и ухудшились показатели плавки на печи № 5. В целом при выплавке ванадиевого чугуна с использованием окатышей с ТТ достигнуто сокращение производства на 2,2 % и перерасходано кокса на 1,4 %.

Существенное повышение прочностных характеристик окатышей с ЧДГ позволило увеличить расход дутья на всех доменных печах на 3,2–6,6 %, тогда как при использовании окатышей с твердым топливом это удалось только на печи № 1. Несмотря на повышение интенсивности плавки, вынос колошниковой пыли сократился с 26 до 24 кг/т чугуна главным образом на доменных печах с усовершенствованными профилями шахт (на ряде печей был уменьшен угол наклона верхней части шахты, что позволило на 35,0–43,5 % снизить давление потока шихты на стенку, повысить на 7,4–15,8 % массу рудной части подачи и степень использования оксида углерода на 1,5–3,6 %).

После приведения к одинаковым условиям плавки периодов 3 и 4 оказалось, что наилучшие показатели были достигнуты на этих же печах. Изменение производительности (П) и расхода кокса (РК) составило, %:

Номер печи	1	2	5
П	+4,0	+1,0	+6,4
РК	–2,8	–4,4	0

Окатыши в сравнении с агломератом имеют более низкий коэффициент внешнего трения по шамотной футеровке (0,410 против 0,463) и при повышении их доли в шихте обеспечивают лучший сход плавильных материалов в печах с малым наклоном стенок шахты. Поэтому на печи № 2 с обычным профилем повысили содержание окатышей от 30 до 50 % и выдерживали состав шихты постоянным. Принятые меры позволили достичь наибольшей экономии кокса. В целом по ванадиевому переделу при плавке окатышей с ЧДГ увеличилась производительность печей на 4 % и сократился удельный расход кокса на 3,7 %. Качество чугуна в опытные периоды 2–4 по содержанию серы осталось без изменения. Степень извлечения ванадия в период 2 снизилась от 81,5 до 77,3 %, а в период 3 возросла от

78,8 до 83,8 % главным образом из-за улучшения ровности хода печей. В наибольшей мере условиям доменной ванадиевой плавки соответствуют окатыши с ЧДГ.

Таким образом, в результате исследования трех технологий производства окисленных качканарских окатышей в высоком слое (интенсивный нагрев, введение твердого топлива и частичная диссоциация гематита) установлено, что только технология с частичной диссоциацией гематита позволяет провести жидкофазное спекание и повысить прочностные характеристики окатышей. Анализ поведения трех типов окатышей в верхних горизонтах доменных печей показал, что наименьшей разрушаемостью в процессе восстановления также обладают окатыши с частичной диссоциацией гематита. Такие окатыши в наибольшей мере отвечают условиям доменной ванадиевой плавки, и их использование в шихте в количестве 30–50 % от массы рудной сыпи позволяет значительно повысить ее технико-экономические показатели.

### **1.6. Улучшение металлургических свойств окатышей Качканарского ГОКа**

Фабрика окатышей Качканарского ГОКа (КГОКа) введена в эксплуатацию в 1970 г. и до настоящего времени производит полностью офлюсованные окатыши.

Проведенный аналитический обзор литературы [15, 27–30] показал, что в процессе восстановления окатыши теряют свои прочностные свойства и увеличиваются в объеме на 6–20 %. Предложенный ранее способ интенсивного нагрева слоя окатышей на обжиговых конвейерных машинах [30] со скоростью 200–300 °С/мин приводит к раннему жидкофазному спеканию окатышей верхнего слоя и торможению окисления, из-за чего структура окатышей разделяется на зоны: магнетитовое ядро и гематитовую оболочку. При охлаждении окатышей в результате усадки ядра и оболочки возникают напряжения, приводящие к растрескиванию и потере прочности [15]. Это, естественно, не позволяет в полной мере реализовать преимущества интенсивного нагрева, обеспечивающего более высокий температурный уровень обработки нижних слоев окатышей. Плавка таких окатышей в доменных печах сопровождается резким снижением прочности окатышей и производительности печей.

Наиболее перспективный способ получения окатышей из качканарского концентрата, обеспечивающий хорошее качество товарной продукции и достаточно высокие показатели доменной плавки, – обжиг с частичной диссоциацией гематита, разработанный в институте «Уралмеханобр» [31]. Он включает окисление окатышей на 85–90 % и последующий обжиг

при 1300–1375 °С до степени диссоциации гематита  $\geq 20$  %. Предварительные

результаты кратковременных промышленных испытаний показали, что прочность частично диссоциированных окатышей в исходном состоянии увеличилась по сравнению с интенсивно нагретыми на 15–20 %, а при восстановлении – в 1,3–1,5 раза с выходом мелочи (<0,5 мм) по

ГОСТ 19575–74 до 30–40 %.

Для оценки технико-экономических показателей работы фабрики окатышей и доменной плавки с частично диссоциированными окатышами была получена опытно-промышленная партия объемом 268 тыс. т [32]. Полученные результаты сравнивались с показателями аналогичных плавков по технологии интенсивного нагрева, используемой на КГОКе раньше. Опытный режим обжига окатышей был реализован на машинах № 1–3. Схема обжиговой машины № 2 приведена на рис. 1.17. Производительность машин по сырым окатышам составляла 100 т/ч при высоте слоя 500 мм и скорости движения обжиговых тележек 1,1 м/мин. Это позволило поддерживать температуру отходящих газов в вакуум-камере № 21 на уровне 350 °С. Температура на границе слой – постель при этом увеличилась до 1150–1180 °С.

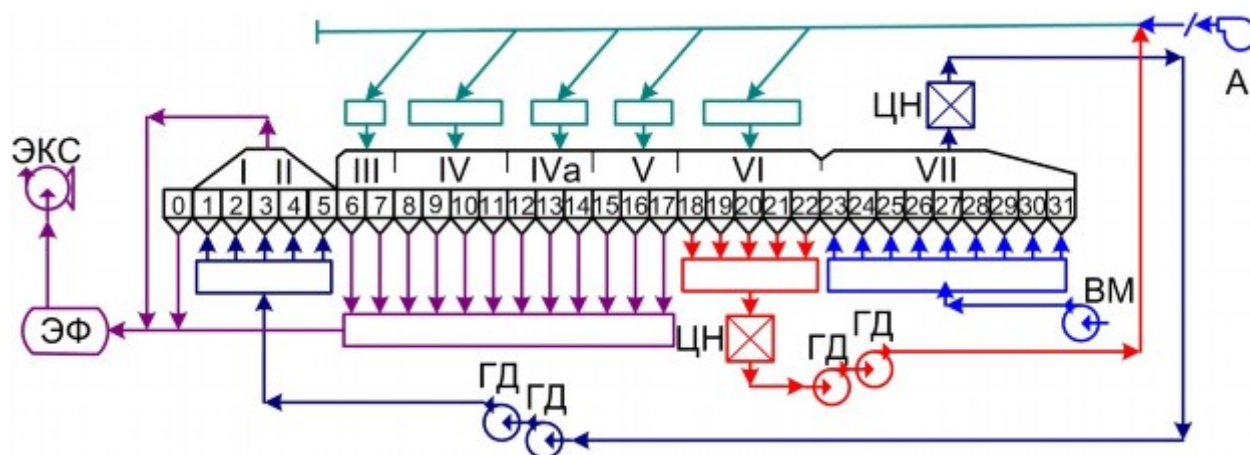


Рис. 1.17. Схема газопотоков обжиговой машины № 2:  
0–31 – номера дутьевых вакуум-камер; I–VII – номера секций горна; ЭКС – эксгаустер;  
ЭФ – электрофильтр; ГД, ВМ, А – вентиляторы; ЦН – циклон



Для наработки опытной партии окатышей с частичной диссоциацией гематита температура в горне секций IV и IVa машин № 1–3 была понижена до 1000–1230 °С. Тем самым была создана отсутствующая при интенсивном нагреве зона подогрева с наиболее благоприятной для окисления магнетита окатышей верхнего слоя температурой. Для сохранения длины зоны высокотемпературного обжига в секции горна VI были установлены шесть дополнительных горелок над вакуум-камерами № 18–20. Температура в секции V была повышена с 1200–1270 до 1350–1400 °С, а в первой половине секции VI установлена равной 1350–1400 °С. Более низкая температура (1200 °С) в секции VI обжиговой машины № 3 связана с отсутствием в опытный период перегородки между секциями VI и VII. В результате холодный воздух из зоны охлаждения перетекал в подгорновое пространство над вакуум-камерами № 18–20. Повышение температуры в зоне обжига на 50–70 °С позволило, несмотря на снижение ее в секциях IV и IVa, обеспечить более глубокий прогрев слоя при сохранении производительности машин 100 т/ч. Более высокий тепловой уровень процесса в опытный период был достигнут благодаря повышенному расходу природного газа на обжиг в целом. Расход природного газа в период наработки опытной партии окатышей (47 м<sup>3</sup>/т) был выше, чем при базовом интенсивном нагреве (45 м<sup>3</sup>/т).

Для оценки качества окатышей опытной партии пользовались данными ОТК НТМК о химическом составе, содержании мелочи (0–5 мм), прочности и истираемости окатышей в соответствии с ГОСТ 15137–77 по всем паспортным пробам в течение месяца. Кроме того, паспортные пробы усреднялись и подвергались испытанию на прочность при восстановлении по ГОСТ 19575–74 в институте «Уралмеханобр». Изменение свойств окатышей по высоте обжигаемого слоя определяли после разделения окатышей со снятой обжиговой тележки на три части: верх (0–170 мм), середина (170–350 мм), низ (350–500 мм). Анализ химического состава проб, а также испытания на прочность окатышей в исходном состоянии и при восстановлении позволили установить следующее. Паспортные пробы прочности мало отличались друг от друга в течение месяца. Прочность на выходе для

классов >5 и <5 мм составила 90,22 и 6,11 % соответственно, содержание

мелочи (класс 0–5 мм) составило 2,52 %. Соответствующие показатели для периода работы фабрики в режиме интенсивного нагрева (базовый режим): 89,58, 6,49 и 3,01 %. Усредненный химический состав паспортной пробы в опытный период был следующим, %: 58,97 Fe; 2,74 FeO; 0,54 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 4,55

CaO; 3,62 SiO<sub>2</sub>; CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,256 (соответствующие данные для режима интенсивного нагрева, %: 58,76 Fe; 3,19 FeO; 0,56 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 4,72 CaO; 3,75SiO<sub>2</sub>; CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,252).

Анализ окатышей со снятых обжиговых тележек подтвердил повышение качества товарной продукции в опытно-промышленной партии: прочность в среднем на паллете составляла 94,0 %, истираемость – 5,1 %, в то время как средняя по паллете прочность окатышей интенсивного нагрева составила 86,8 %. Отмечено, что увеличение прочности окатышей с частичной диссоциацией гематита привело в опытный период к снижению мелочи в товарной продукции с 3,01 до 2,52 %. Этот показатель непосредственно влияет на производительность и расход кокса в доменных печах. Существенным показателем при оценке качества является также разрушение сырья в ходе восстановления. Хотя этот показатель не введен в технические условия на окатыши, косвенно о поведении сырья в доменной печи можно судить по испытаниям на установке Линдера (ГОСТ 19575–74).

В табл. 1.16 приведены данные испытаний на установке Линдера паспортных проб за каждую пятидневку месяца (пробы № 1–6) и проб со снятых обжиговых тележек при производстве частично диссоциированных окатышей (опытный режим) и окатышей, полученных по технологии интенсивного нагрева (базовый режим). Для сравнения с паспортными пробами опытного периода использованы данные по пробам с охладителя машины № 2 во время ее работы в режиме интенсивного нагрева, т. к. было показано, что качество товарных окатышей только незначительно отличается от отобранных с охладителя. Представленные результаты свидетельствуют, что, как и для прочности в исходном состоянии заметных колебаний прочности и истираемости окатышей после восстановления в течение

месяца не отмечено. Выход мелочи (<0,5 мм) составил в среднем 52,8 %,

крупных фракций (>10 мм) – 3,16 %. Следует отметить, что разрушае-

мость классов 0,5–5 мм была несколько выше в первую десятидневку месяца (29,6 %), чем во вторую и третью (23,5 и 25,7 % соответственно).

Сравнение средних за месяц данных по прочности, истираемости и разрушаемости при восстановлении окатышей с частичной диссоциацией гематита с аналогичными данными, полученными с охладителя обжиговой

машины № 2 при интенсивном нагреве, показывает некоторое улучшение качества при сохранении восстановимости. Обращает на себя внимание более высокое содержание монооксида железа в окатышах в паллете, снятой с обжиговой машины № 1 в опытный период (по сравнению с окатышами интенсивного нагрева). В верхнем слое содержание FeO составляет 14,5 %, что соответствует диссоциации гематита более чем на 50 %, в нижних слоях диссоциация менее глубокая и не превышает 20 %.

Несмотря на то, что содержание монооксида железа в частично диссоциированных окатышах несколько выше и такие окатыши прочнее, чем интенсивно нагретые, не следует проводить прямую корреляцию между содержанием FeO и металлургическими свойствами окатышей. Справедливость отмеченного подтверждается результатами анализа окатышей со снятых обжиговых тележек. Более закисные окатыши верхнего слоя при интенсивном нагреве с содержанием 9,66 % FeO практически полностью

разрушаются при восстановлении: выход класса <0,5 мм составил 70 %,

а крупные фракции (>10 мм) отсутствовали. В меньшей степени, но также

довольно сильно разрушаются частично диссоциированные окатыши верхнего слоя с 14,5 % FeO, в то же время наименьший выход мелочи после восстановления имеют диссоциированные окатыши среднего слоя с 5 % FeO.

Таблица 1.16

**Металлургические свойства окатышей, полученных по технологиям интенсивного нагрева**  
**(базовый режим – до косой черты) и с частичной диссоциацией гематита (опытный режим – после косой черты)**  
**при восстановлении по ГОСТ 19575–74**

Характеристика пробы	Свойства окатышей				
	Содержание FeO, %	Прочность по выходу класса > 10 мм, %	Разрушаемость по выходу класса < 0,5–5 мм, %	Истираемость по выходу класса < 0,5 мм, %	Восстановимость, %
С обжиговой тележки:					
верх слоя	9,66/14,50	0,30/2,50	–/28,80	70,00/53,90	32,60/22,10
середина слоя	2,23/4,80	1,05/1,84	–/36,20	51,70/33,72	37,50/28,30
низ слоя	1,68/4,80	0,30/0,96	–/45,10	49,30/42,30	31,60/28,30
средняя по слою	4,50/8,03	0,55/1,77	–/36,70	57,00/43,00	33,90/26,20
Усредненная паспортная проба №:					
1	–/2,79*	–/2,12	–/26,90	–/51,60	–/37,00
2	–/2,76*	–/3,10	–/32,30	–/51,30	–/32,00
3	–/2,66	–/6,10	–/25,00	–/54,00	–/29,80
4	–/2,46*	–/3,30	–/22,10	–/53,30	–/30,80
	–/6,00**	–	–	–	–
5	–/2,75*	–/1,70	–/19,20	–/54,40	–/38,40
	–/6,60**	–	–	–	–
6	–/3,07*	–/2,62	–/36,26	–/52,00	–/30,10
	–/4,24**	–	–	–	–
Средняя по шести паспортным пробам	–/2,74*	–/3,16	–/26,30	–/52,80	–/31,40
	–/5,60**	–	–	–	–

Средняя проба с охладителя машины № 2	3,16**/–	0,30/–	26,30/–	57,50/–	–/–
---------------------------------------	----------	--------	---------	---------	-----

\*По данным КГОКа

\*\*По данным Уралмеханобра

Причина того, что частичная замена разбухающего при восстановлении гематита на неразбухающий магнетит не приводит к снижению разрушения при восстановлении, заключается в особенностях структуры. Окатыши верхнего слоя во время охлаждения на продув в зоне вакуум-камер № 23–31 в течение 15–20 мин находятся при температуре 700–1000 °С, получаемой за счет теплоты, передаваемой воздухом, охлаждающим нижние слои. При этом стекло рекристаллизуется с образованием трещин на границе кристаллитов. По этим трещинам восстановленный газ проникает к гематиту, вызывая его низкотемпературное восстановление и разбухание. Возникающие локальные напряжения распространяются и разрушают окатыши. Для интенсивно нагретых закисных окатышей положение осложняется образованием трещин на границе ядра и оболочки, поэтому их разрушение сильнее. Средние слои диссоциированных окатышей не подвергаются столь длительному высокотемпературному обжигу и имеют стеклообразную связку. Это способствует сохранению их прочности при восстановлении.

Таким образом, проведенный анализ характера разрушения при восстановлении окатышей с частичной диссоциацией гематита и интенсивно нагретых показывает явное преимущество первых. Однако сильное разрушение верхних, высокозакисных окатышей при охлаждении на конвейерной машине свидетельствует, что нет необходимости в такой глубокой диссоциации окатышей верхних слоев. Другими словами, принятый в испытаниях максимальный уровень температур обжига (1390–1400 °С) вряд ли целесообразен и при некотором снижении металлургические свойства могут быть улучшены. Подтверждением этому служат результаты предварительных испытаний. На режим, близкий к диссоциирующему, временно переводили конвейерные машины № 1–3. Температуру в секциях IV и IVa уменьшали до 1100–1200 °С, а в зоне обжига поддерживали равной 1350–1370 °С. Полученные данные свидетельствуют об увеличении прочности и снижении истираемости окатышей при восстановлении.

Окатыши использовали на НТМК в доменных печах № 1, 2 и 5 полезным объемом 1242, 1242 и 1719 м<sup>3</sup> соответственно. За базовый период (1) для технико-экономического анализа была принята работа доменных печей за 24 дня до и 15 дней после проведения опытного периода (2), продолжавшегося в течение месяца. Свойства окатышей в печах сравнивались с аналогичными свойствами для периодов работы фабрики окатышей по технологии интенсивного нагрева. В обоих периодах доля окатышей в шихте (39,3 % – базовый и 39,6 % – опытный) и показатели качества компонентов шихты отличались незначительно: содержание железа в концентрате 62,56 и 62,55 %, влажность концентрата 9,06 и 9,16 %, влажность шихты 8,62 и 8,59, содержание в шихте класса 0–0,074 мм 91,87 и 92,30 %; основность 1,251 и 1,248 соответственно для базового и опытного перио-

дов. Прочность сырых окатышей – 16,5 и 17,0 Н/окатыш, прочность на сбрасывание (раз) – 17,16 и 17,00. В окатышах обоих периодов преоблада-

ли фракции >15 мм (42,57 и 42,10 %) и >12 мм (42,95 и 47,30 %). Окатыши

в опытном периоде (с частичной диссоциацией гематита) имели лучшие прочностные характеристики по сравнению с окатышами базового периода (с интенсивным нагревом) по выходу фракции как >5 мм ( $B_{>5}$ ) (90,22 про-

тив 89,68 %), так и <0,5 мм ( $B_{<0,5}$ ) (6,11 против 6,43 %) при истирании

в стандартном барабане (ГОСТ 15137–77).

Измерение температур, анализ проб газа (на газоанализаторе ВТИ–2) и материалов осуществляли в опытном периоде на печи № 1, а в базовом – на печи № 2 на горизонте, удаленном на 2 м от поверхности засыпи, определяли прочность исходных окатышей на раздавливание и их химический состав. В обоих периодах шихтовые материалы загружали в печь по системе РРКК (Р – рудная часть шихты, К – кокс) с содержанием окатышей до 30 %.

Степень восстановления (СВ) рудных материалов устанавливали по количеству отнятого кислорода на основе химических анализов исходных (базовый режим) и извлеченных из печи (опытный режим) материалов по формуле

$$CB = 100 \left[ (O_{Fe}/Fe)_1 - (O_{Fe}/Fe)_2 \right] / (O_{Fe}/Fe)_1,$$

где Fe и  $O_{Fe}$  – содержание железа в сырье и кислорода в оксидах железа, %. Степень восстановления окатышей (рис. 1.18) находилась в соответствии с распределением температуры и состава газа по радиусу шихты, а также с показателем восстановления при лабораторном испытании окатышей со снятых обжиговых тележек (33,9 и 21,2 % в первом и втором периодах соответственно). Средние величины степени восстановления, %, материалов

(к окатышам и агломерату отнесены частицы >5 мм, железорудный мате-

риал – все частицы, за исключением немагнитной части (5–0 мм) на исследованном горизонте в двух периодах (базовый/опытный) приведены ниже:

Железорудный материал	7,1/5,5
Окатыши	5,6/0,9
Агломерат	5,6/7,0

Степень восстановления окатышей в опытном периоде была низкой. Процесс восстановления на большей части радиуса печи только начинался (СВ = 0,0–0,2 %). Восстановление окатышей получило заметное развитие лишь в периферийной части исследуемого горизонта. В базовом периоде окатыши обладали несколько большей восстановимостью при высоких температурах, поэтому процесс восстановления протекал с большей скоростью (2,8 против 0,4 %/мин в опытном периоде). СВ агломерата зависела от восстановимости окатышей: агломерат содержал значительно большее количество кислорода в оксидах железа в смеси с окатышами интенсивного нагрева, чем в смеси с опытными окатышами.

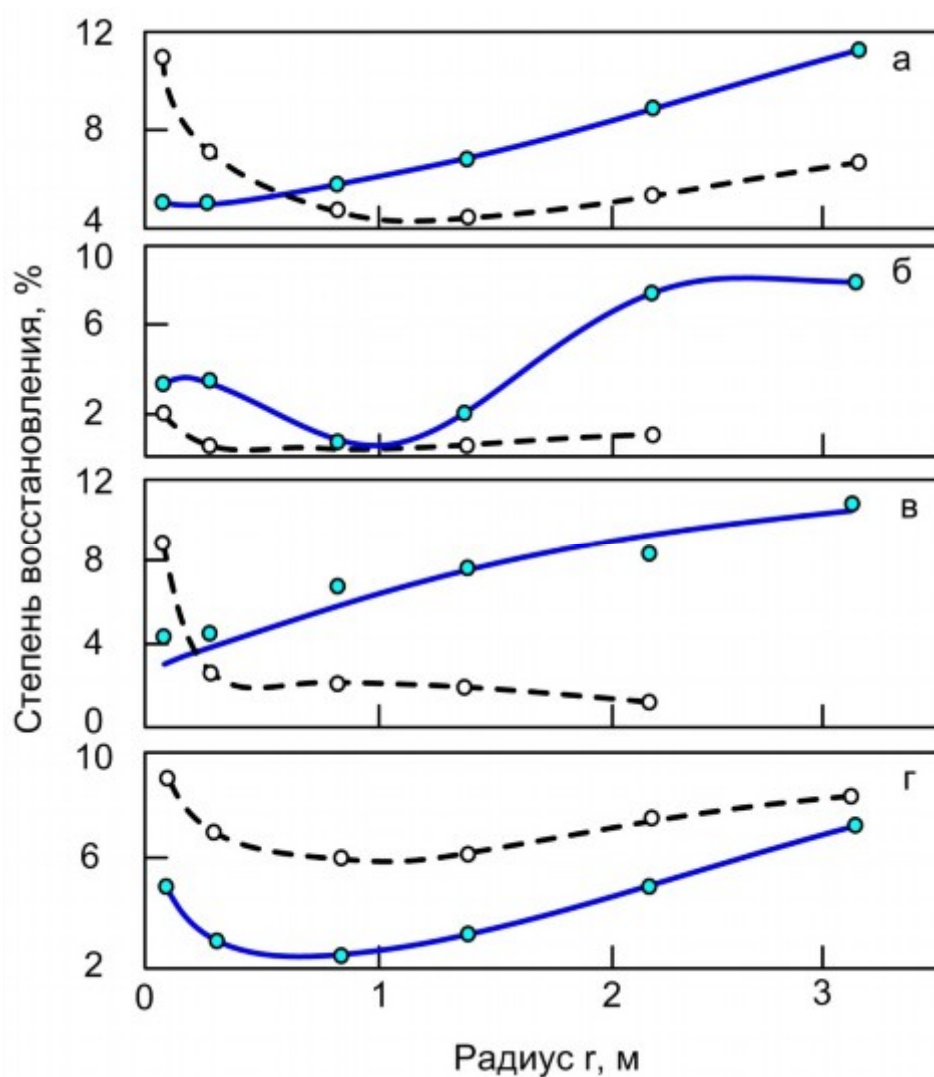


Рис. 1.18. Изменение степени восстановления рудных материалов,



окатышей и агломерата по радиусу доменной печи:

*a* – рудные материалы; *б* – окатыши целые; *в* – окатыши колотые (>5 мм);

*г* – агломерат (>5 мм); базовый период – сплошная линия;

опытный период – пунктирная линия

Прочность окатышей в исходном состоянии в двух периодах составляла 1800 и 2120 Н/окатыш соответственно. На исследуемом горизонте шахты наименьшую прочность имели окатыши обоих типов, расположенные вблизи стенки и у оси печи (рис. 1.19), а наибольшую – в промежуточной части радиуса, где процессы восстановления были развиты незначительно. В опытном периоде в зоне с максимальной рудной нагрузкой опытные окатыши сохранили прочностные свойства и в целом характеризовались наименьшим снижением прочности на 1 м радиуса доменной печи: 11,5 против 42,5 Н/окатыш в базовом периоде. Причина такой существенной разницы разрушаемости опытных окатышей состоит в их однородной структуре. Интенсивно нагретые окисленные окатыши текущего производства имеют малопрочную зональную структуру и локальное развитие силикатной связки вследствие недоокисления магнетита концентрата в ядре.

Изменение размера частиц по радиусу печи (рис. 1.20) в целом отразило распределение температур и развитие процессов восстановления аг-

ломерата и окатышей в двух периодах. Содержание класса >10 мм в обоих

периодах на расстоянии до 1,4 м от стенки шахты было примерно одинаковым, но по разным причинам. Так, если в опытном периоде это было вызвано меньшей разрушаемостью окатышей, преимущественно сконцентрированных на этом удалении от периферии, то в базовом периоде содержание крупных частиц определялось поведением агломерата. При разрушении опытные окатыши образовывали более крупные частицы, чем интенсивно нагретые, поэтому снижение количества мелких частиц в перифе-

рийной части шахты позволило в опытный период увеличить расход дутья и повысить интенсивность плавки.

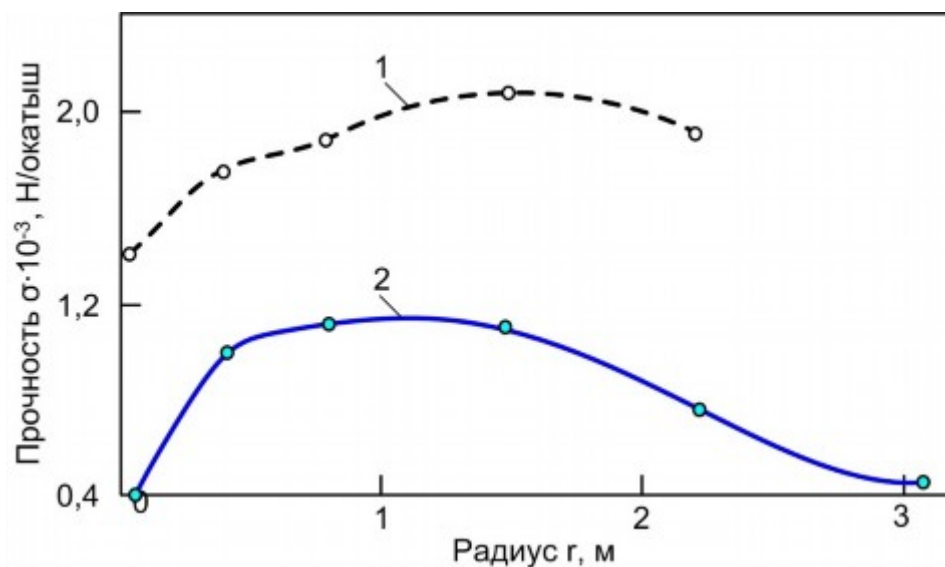


Рис. 1.19. Изменение прочности целых окатышей на сжатие по радиусу доменной печи:  
1 – опытный период; 2 – базовый период

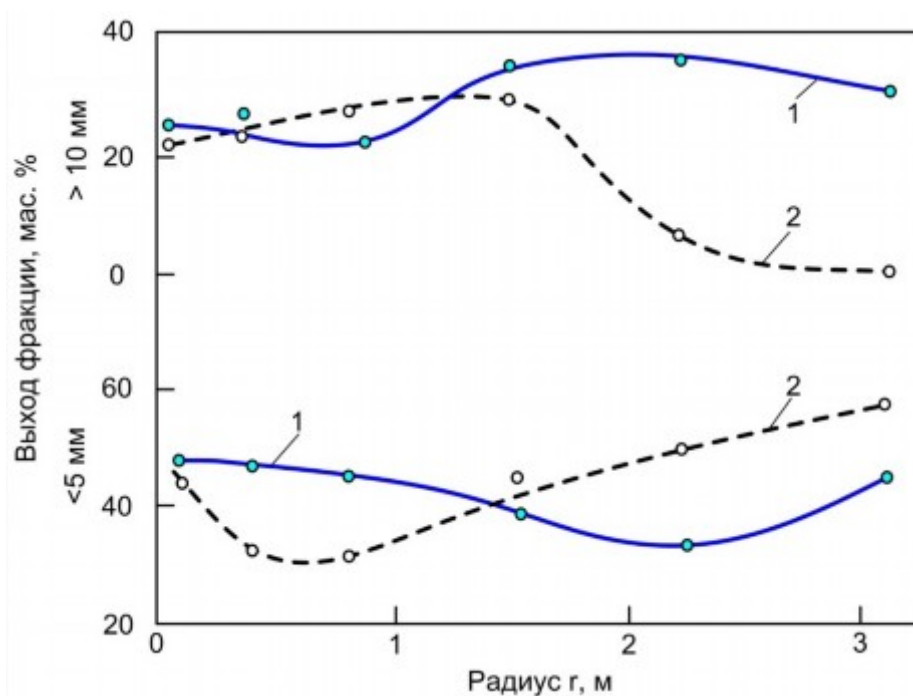


Рис. 1.20. Изменение гранулометрического состава шихты по радиусу доменной печи:

1 – базовый период; 2 – опытный период

Основные показатели работы печей приведены в табл. 1.17. Повышение прочности окатышей в опытном периоде позволило увеличить расход дутья на печах № 1, 2 и 5 на 3,2; 3,4 и 6,6 % соответственно, а количество проплавляемого сырья – в среднем на 0,6 %. Несмотря на повышение интенсивности плавки, вынос колошниковой пыли не увеличился и сохранился равным 24 кг/т чугуна. На печи № 2 с увеличенным (на 5,4 %) расходом окатышей с частичной диссоциацией гематита вынос колошниковой пыли даже сократился с 26 до 25 кг/т чугуна. Благодаря улучшению стабильности хода печи повысились в опытном периоде качество чугуна по содержанию серы в целом по ванадиевому переделу и коэффициент извлечения ванадия (с 78,1 до 81,3 %) несмотря на снижение поступления ванадия с рудными материалами.

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлено, что наиболее перспективной технологией является технология получения качканарских окатышей на обжиговых машинах с частичной диссоциацией гематита. Использование таких окатышей в доменных печах НТМК привело к улучшению технико-экономических показателей и увеличению производительности печей за счет снижения разрушаемости окатышей при восстановлении, расхода кокса и природного газа.

Таблица 1.17

**Основные показатели работы доменных печей НТМК, выплавляющих ванадиевый чугу́н с окатышами окисленными (до косой черты) и с частичной диссоциацией гематита (после косой черты)**

Показатели	Номер печи			Среднее по трем печам
	1	2	5	
Продолжительность работы печей, сут	39/30	39/30	34/29	37,3/29,6
Производительность, т/сут	2680/2702	2456/2439	3233/3322	2790/2831
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	448/450	437/429	498/498	464,1/462,5
Содержание железа в шихте, %	57,4/57,3	57,6/57,7	57,4/57,4	57,5/57,5
Содержание в шихте, %:				
агломерата КГОК	60,0/57,8	48,9/40,5	57,7/57,1	55,5/51,8
окатышей КГОК	35,4/34,4	46,4/51,8	38,2/37,2	40,0/41,1
агломерата НТМК	4,6/7,8	4,7/7,7	4,1/5,7	4,5/7,1
Состав чугуна, %:				
Si	0,23/0,22	0,22/0,22	0,17/0,19	0,21/0,21
Mn	0,33/0,35	0,32/0,36	0,32/0,34	0,32/0,35
S	0,021/0,021	0,025/0,022	0,024/0,024	0,023/0,022
V	0,446/0,439	0,444/0,443	0,439/0,430	0,443/0,437
Ti	0,23/0,26	0,22/0,26	0,20/0,21	0,22/0,24
Степень извлечения ванадия, %	78,8/82,2	79,7/83,6	74,8/78,1	78,1/81,3
Основность шлака (CaO/SiO <sub>2</sub> )	1,12/1,12	1,14/1,12	1,09/1,09	1,11/1,11
Вынос пыли, кг/т чугуна	26/26	26/25	21/22	24/24
Простои, %	1,80/1,01	2,09/2,96	1,39/1,08	1,76/1,68
Тихий ход, %	0,41/0,32	0,34/0,10	0,97/0,16	0,57/0,19



### 1.7. Влияние качества концентрата из различных титаномагнетитовых руд на металлургические свойства офлюсованных окатышей

На фабрике окатышей Качканарского ГОКа (КГОКа) производят офлюсованные окатыши основностью 1,25, показатели прочности которых в отдельные периоды значительно отклоняются от средних значений для товарных окатышей. Одной из причин этого является изменение качества концентрата, поступающего на окомкование, из-за различия обогатимости и вещественного состава отдельных разновидностей руд, подаваемых на обогащение, и неизбежной вариации их количественного соотношения.

В данном разделе рассмотрены результаты исследования [33] влияния качества концентрата из отдельных разновидностей титаномагнетитовых руд КГОКа на показатели качества офлюсованных окатышей. При этом изучали три разновидности титаномагнетитовых концентратов (1, 2, 3), полученных соответственно из руд текущей добычи, верлитовой и горнблендитовой руд примерно одинаковой степени измельчения (92–97 % фракции  $<0,074$  мм). Минеральный состав разновидностей концентратов приведен в табл. 1.18, а их химический состав – в табл. 1.19. Из таблиц видно, что различие химического состава концентратов обусловлено особенностями их минерального состава. Для сравнения в табл. 1.19 приведен химический состав промышленного концентрата КГОКа (0), а также известняка (Высокогорского РУ) и саригюхского бентонита, использованных для получения окатышей.

Изучались свойства окатышей, полученных как из чистых разновидностей концентратов (1, 2, 3), так и из их двойных и тройных смесей, в которых соотношение компонентов в массовых долях равно соответственно 1:1 и 1:1:1. Расход шихтовых материалов (в расчете на 100 кг обожженных окатышей) для всех разновидностей концентратов и их симметричных смесей дан в табл. 1.20. Основные параметры окатышей, полученных на лабораторном грануляторе барабанного типа, приведены в табл. 1.21.

Таблица 1.18

**Минеральный состав концентратов, %**

Минерал	Разновидность концентратов		
	1	2	3
Титаномагнетит	94,9	85,0	93,1
Ильменит	0,4	0,2	1,0
Пироксены	3,7	1,6	–
Роговая обманка	–	–	5,6
Серпентины	1,0	13,2	–
Шпинель	–	–	0,3
Сумма	100	100	100

Таблица 1.19

## Химические и физические характеристики сырых материалов

Характеристика	Разновидность концентрата				Известняк	Бентонит
	0	1	2	3		
Химический состав, %						
Fe	62,57	64,36	57,80	63,58	1,015	2,27
FeO	27,94	28,42	25,00	27,76	–	–
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58,34	60,36	54,79	59,98	1,64	3,24
CaO	0,98	0,78	0,36	0,75	53,35	1,95
SiO <sub>2</sub>	3,30	2,49	6,42	2,43	1,58	57,80
MgO	2,32	1,83	6,63	1,10	0,80	9,30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,49	2,09	1,82	2,86	0,70	17,40
TiO <sub>2</sub>	2,90	2,48	1,69	3,10	–	–
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,55	0,58	0,35	0,65	–	–
MnO	0,35	0,23	0,31	0,30	–	–
S	0,003	0,008	0,013	0,003	–	–
ПМПП	0,79	0,71	2,35	0,95	42,0	7,18
P	0,004	0,004	0,004	0,004	–	–
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,03	0,16	0,03	–	–
K <sub>2</sub> O + N <sub>2</sub> O	0,06	0,06	0,06	0,07	–	–
Cu	–	0,01	0,01	0,01	–	–
Zn	–	0,02	0,02	0,03	–	–
Сумма	100,06	100,1	99,98	100,03	100,07	96,87
Содержание, %, фракции, мм:						
>0,074	4,8	5,6	2,5	8,6	–	–
0,074–0,05	38,9	37,4	29,3	33,3	–	–
<0,05	56,3	57,0	68,0	54,1	–	–
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	0,111	0,143	0,147	0,112	0,382	0,233
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	4,66	4,78	4,34	4,75	2,80	2,46

Таблица 1.20

### Характеристики шихт из разновидностей концентратов и их смесей

Показатель	Разновидность концентратов и смесей						
	1	2	3	1+2	1+3	2+3	1+2+3
Расход шихтовых материалов, кг/100 кг окисленных окатышей:							
концентрата из руд текущей добычи	93,53	0	0	45,96	46,85	0	30,82
концентрата из верлитовой руды	0	90,36	0	45,96	0	46,04	30,82
концентрата из горнблендитовой руды	0	0	93,87	0	46,85	46,04	30,82
известняка	5,62	14,86	5,55	10,32	5,57	10,30	8,75
бентонита	1	1	1	1	1	1	1
Всего	100,15	106,22	100,42	103,24	100,29	106,38	102,31
Истинная плотность шихт, $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	4,50	3,95	4,50	4,24	4,50	4,23	4,34
Удельная поверхность шихт, м <sup>2</sup> /г	0,157	0,183	0,129	0,175	0,175	0,158	0,155
Показатели комкуемости*:							
наименьшая капиллярная влагоемкость, %	6,17	7,76	8,03	–	–	–	–
максимальная капиллярная влагоемкость, %	24,54	28,63	24,46	–	–	–	–
показатель относительной комкуемости, отн.ед.	0,33	0,36	0,48	0,34	0,40	0,42	0,39
Оптимальная влажность окомкования, %	8,85	10,87	10,15	9,86	9,50	10,51	9,95

\*Показатели для смесей определены по методу аддитивного расчета

Таблица 1.21

### Характеристики сырых окатышей

Показатель	Разновидность концентратов и смесей							
	0	1	2	3	1+2	1+3	2+3	1+2+3
Влажность, %	7,13	7,55	9,11	7,5	8,09	7,73	8,04	8,18
Прочность, Н/окатыш:								
максимальная	19,4	17,9	17,9	14,6	15,7	16,7	15,0	16,0
минимальная	14,3	13,3	12,5	10,6	11,0	10,5	9,7	10,7
средняя	17,4	15,6	15,5	12,7	13,5	14,5	12,4	13,2
Максимальная высота падения, м	0,88	0,64	0,90	0,79	0,85	0,75	0,85	0,85
Число падений с высоты 0,3 м	9,3	7,8	9,8	5,8	9,0	8,0	7,5	7,5



Зависимость прочности окатышей при сжатии от температуры обжига исследовали путем нагрева сухих окатышей диаметром 12–14 мм в печи Таммана (по 18 шт.) в потоке воздуха при расходе 15 л/мин и раздавливания обожженных окатышей на машине Р–0,5 (по 15 шт.). Температурный режим обжига был следующий: нагрев со скоростью 100 °С/мин, окислительная выдержка при 1100 °С в течение 6 мин, нагрев до температуры обжига (1200, 1250, 1300, 1350, 1385 °С) и выдержка 8 мин, затем охлаждение со скоростью 100 °С/мин (первая серия опытов) и 50 °С/мин (вторая серия опытов).

Усредненные результаты опытов изображены на рис. 1.21. Для всех трех разновидностей окатышей имеется более или менее сильно выраженное понижение прочности при температурах обжига 1270–1350 °С. При температуре выше 1330–1350 °С прочность окатышей из всех разновидностей концентратов резко возрастает, однако если говорить о разновидности 2 (из верлитовой руды), то это относится только к целым, не растрескавшимся при охлаждении окатышам. Так как обожженные при 1330–1385 °С верлитовые окатыши начинают в большом количестве (до 40–50 % от общего числа) раскалываться на 2–4 части еще в процессе охлаждения, то, приписывая расколотым окатышам прочность 0 (Н/окатыш), можно определить «эффективную» прочность таких окатышей, которая на рис. 1.21

отображена кривой 3'. Резкое отличие характера зависимости прочности

окатышей от температуры обжига, наблюдаемое в опытах с верлитовыми окатышами, объясняется, очевидно, избытком шлакообразующих оксидов в шихте этих окатышей (около 20 %). Можно также предположить, что в процессе охлаждения верлитовых окатышей в них возникают значительные структурные напряжения, которые могут быть связаны с полиморфными превращениями отдельных минеральных фаз, образующихся из расплава.

С целью определения таких важнейших характеристик окатышей, как устойчивость к механическому истиранию (по испытанию в барабане) и низкотемпературному разрушению в восстановительной атмосфере (по ГОСТ 19575–74), были проведены опыты по обжигу окатышей на экспериментальной установке типа аглочаша. Изучение свойств окатышей из смесей разновидностей концентратов проводили только в режиме окисли-

тельного обжига, но в широком диапазоне температур. Для моделирования слоевого обжига окатышей на лабораторной установке была принята температура обжига 1220–1330 °С при высоте слоя 300 мм (без постели).

Чтобы изучить при небольшом числе опытов всю совокупность смесей из трех разновидностей концентратов, применяли метод симплекс-решетчатого планирования экспериментов [34]. Для описания свойств окатышей из смесей концентратов использовали неполный кубический полином:

$$y = A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 + A_{12}x_1x_2 + A_{13}x_1x_3 + A_{23}x_2x_3 + A_{123}x_1x_2x_3, \quad (1.12)$$

где  $y$  – численное значение какого-либо параметра (свойства) окатышей из смеси концентратов;

$x$  – доля  $i$ -й разновидности в смеси;

$A_i, A_{ij}$  – коэффициенты, определяемые по результатам экспериментов.

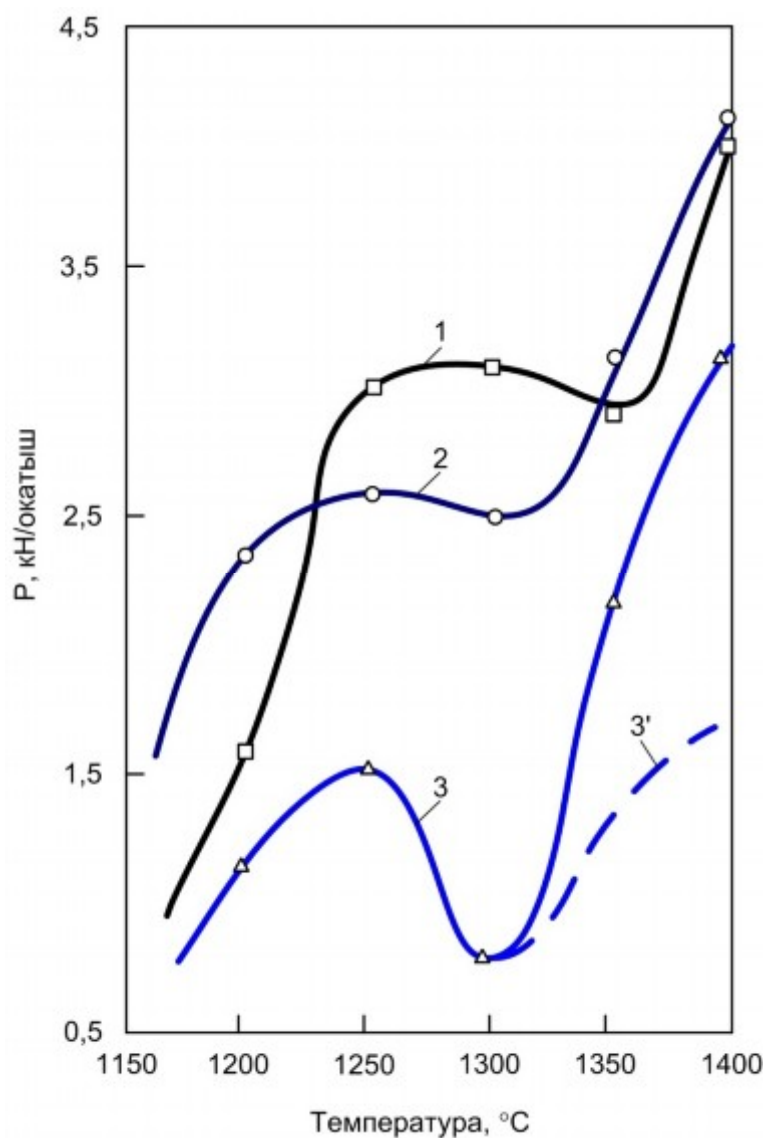


Рис. 1.21. Зависимость прочности окатышей  
от температуры обжига в токе воздуха:

1 – из горнблендитовой руды; 2 – из руд текущей добычи; 3, 3' – из верлитовой руды

Для определения коэффициентов уравнения (1.12) были установлены свойства окатышей из семи различных шихт, полученных из отдельных разновидностей концентратов (3 шт.), из их парных смесей 1:1 (3 шт.) и из их тройной смеси 1:1:1 (1 шт.). Анализ полученных данных показывает, что прочность при сжатии окатышей из промышленного концентрата 0 и из концентрата 1 оказалась примерно одинаковой как для верхних горизонтов слоя (температура обжига 1270–1330 °С, рис. 1.22, а), так и для нижних (температура обжига 1220–1280 °С, рис. 1.22, б). Примерно одинаковыми оказались для этих концентратов и зависимости прочности окатышей от их диаметра.

Падение прочности окатышей с увеличением их диаметра связано с незавершенностью процесса спекания на всю глубину окатышей при заданном температурно-временном режиме обжига. В этом смысле наиболее благоприятным режим обжига был для окатышей из горнблендитового концентрата, прочность которых с увеличением диаметра росла почти линейно, особенно при температурах обжига 1270–1330 °С. Окатыши из разновидности концентрата 2 при температуре обжига 1270–1330 °С оказались очень непрочными, что подтвердило ранее выявленный «провал» прочности окатышей этого вида в данном интервале температур обжига (рис. 1.21). Прочность при сжатии для окатышей из симметричных смесей в основном подчинялась правилу аддитивности.

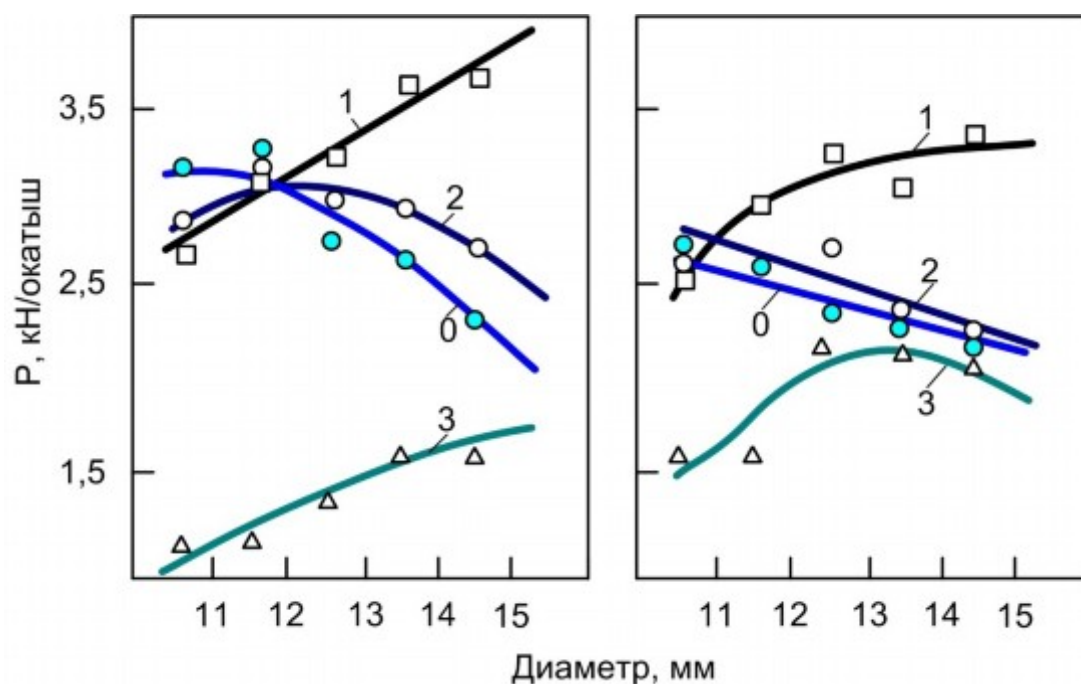


Рис. 1.22. Зависимость прочности окатышей  
из разновидностей концентратов от диаметра:  
*a* – верхняя половина слоя; *б* – нижняя половина слоя;  
концентрат: 0 – промышленный, 1 – из горнблендитовой руды;  
2 – из руд текущей добычи; 3 – из верлитовой руды

Для характеристики прочности окатышей в целом по слою применительно к фракционному составу окатышей, получаемых на промышленных грануляторах, принята величина средневзвешенной прочности для основной фракции 10–15 мм, составляющей 70–80 % всей массы окатышей.

Установлено, что размеры окатышей, полученных на грануляторах фабрики окатышей КГОКа, распределены приблизительно по нормальному закону [35]. Исходя из этого, рассчитали фракционные составы обожженных окатышей, полученных в лабораторных условиях (99 % окатышей фракции 10–15 мм), и промышленных окатышей (99 % окатышей фракции 7,5–18,5 мм) (табл. 1.22). Из табл. 1.22 видно, что среди лабораторных преобладают окатыши более мелкой фракции (11–14 мм), чем среди промышленных, где основной является фракция 12–16 мм.

Таблица 1.22

**Фракционный состав промышленных (А) и лабораторных (Б) окатышей**

Окатыши	Содержание, %, окатышей размером, мм						
	<10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	>15
А	3,0	5,3	10,2	15,8	18,9	18,3	28,5

Б	0,3	3,4	18,9	38,7	29,4	8,3	1,0
---	-----	-----	------	------	------	-----	-----

Данные табл. 1.22 позволяют записать выражение для средневзвешенной прочности  $P$ , Н/окатыш, промышленных окатышей фракции 10–15 мм:

$$P = 0,077P_{10-11} + 0,149P_{11-12} + 0,231P_{12-13} + 0,276P_{13-14} + 0,267P_{14-15}, \quad (1.13)$$

где 0,077 – доля узкой фракции 10–11 мм в составе широкой фракции 10–15 мм;

$P_{10-11}$  – прочность при сжатии, полученная для узкой фракции 10–11 мм и т. д.

Таким образом, средневзвешенная прочность окатышей характеризует основную массу промышленных окатышей, исключая очень мелкие или очень крупные окатыши, а также их осколки с неопределенной прочностью.

Изучение общей пористости окатышей диаметром  $13 \pm 0,5$  мм (изменяется от 20,3 до 32,7 %) показало, что более прочные окатыши имеют, как правило, более низкую пористость. При этом пористость окатышей, обожженных при более высокой температуре, несколько ниже, что соответствует и более высокой прочности окатышей высокотемпературного обжига. Исключение составляют верлитовые окатыши, при повышенной температуре обжига имеющие пониженную пористость и прочность.

Наибольший (до 10,5 %) выход мелочи  $< 0,5$  мм при испытании в барабане получается у окатышей из разновидности концентрата 2, которые имеют и наименьшую прочность при сжатии. В противоречии с высокой прочностью при сжатии находятся результаты испытаний в барабане для окатышей из разновидности концентрата 3, сопротивляемость которых к механическому истиранию оказалась пониженной. Наибольшая стойкость к истиранию наблюдается у окатышей из руд текущей добычи (выход мелочи  $< 0,5$  мм не превышает 1,5 %). По выходу мелочи при восста-

новлении наилучшие показатели получены для окатышей из верлитового концентрата и смесей на его основе. Разновидность концентрата 3 с этой

точки зрения является наименее приемлемой (до 93,3 % мелочи  $<0,5$  мм).

Что касается степени восстановления окатышей, то существенного различия между отдельными разновидностями окатышей по этому показателю не наблюдается.

В табл. 1.23 приведены все основные показатели качества окатышей из отдельных разновидностей концентратов и их смесей, отобранных с различных горизонтов слоя высотой 300 мм. Это позволяет проанализировать изменение показателя качества окатышей в зависимости от их глубины залегания в слое при обжиге на конвейерной машине. Из табл. 1.23 видно, что только прочность окатышей при сжатии и прочность их при испытании в барабане оказались существенно зависимыми от «глубины залегания».

Анализ данных показывает, что показатели механической прочности окатышей из смесей концентратов в основном подчиняются правилу адди-

тивности, хотя для выхода мелочи  $<0,5$  мм это правило лучше соблюдает-

ся для нижних горизонтов слоя, т. е. при пониженных температурах обжи-

га. Для верхних горизонтов слоя выход мелочи  $<0,5$  мм в барабане прави-

лу аддитивности не подчиняется из-за отличия свойств окатышей из верлитового концентрата от свойств других окатышей. Очень низкая механическая прочность этих окатышей при температурах обжига 1300–1330 °С

проявилась в том, что выход мелочи  $<0,5$  мм при испытании в барабане

оказался для них довольно высоким (до 7 %), причем в основном за счет фракции 0,5–5,0 мм, образовавшейся вследствие разрушения большого числа окатышей (до 40 % по визуальной оценке).

Таблица 1.23

**Показатели прочности и восстановимости окатышей из разновидностей концентратов и смесей в зависимости от условий глубины залегания в слое**

Условная глубина, мм	Разновидность концентрата, смеси							
	0	1	2	3	1+2	1+3	2+3	1+2+3
<b>Прочность окатышей при сжатии, Н/окатыш</b>								
0–75	3250	3270	1190	3590	2350	3310	2350	2540
75–150	2170	2570	1670	3210	2360	2670	2430	2450
150–225	2470	2750	1930	3110	2190	2900	2370	2520
225–300	2290	2190	2090	3110	2070	2710	2210	2390
В среднем	2550	2700	1720	3260	2240	2900	2340	2480
<b>Выход мелочи &lt;0,5 в барабане, %</b>								
0–75	1,5	1,0	2,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0
75–150	1,0	0,5	2,0	2,0	1,5	2,0	2,0	2,0
150–225	2,5	1,5	7,5	3,0	4,5	2,0	5,5	3,5
225–300	1,5	1,5	10,5	3,5	5,5	2,5	7,0	5,5
В среднем	1,4	1,1	5,4	2,5	3,1	1,9	4,0	3,0
<b>Выход мелочи &lt;5,0 в барабане, %</b>								
0–75	1,5	1,0	7,0	2,0	1,0	1,0	1,5	1,0
75–150	1,0	1,0	3,5	2,0	1,5	2,0	2,0	2,0
150–225	1,5	1,5	3,5	3,0	4,5	2,0	5,5	3,5
225–300	1,5	1,5	10,5	3,5	5,5	3,0	7,0	5,5
В среднем	1,4	1,3	7,1	2,6	3,1	2,0	4,0	3,0
<b>Выход мелочи &lt;0,5 при восстановлении, %</b>								
0–75	69,5	63,7	16,5	78,8	42,9	70,6	59,6	62,7
75–150	–	52,8	34,5	66,2	42,9	55,7	–	57,6
150–225	63,9	60,1	27,7	74,1	52,4	68,1	71,0	64,4
225–300	–	47,9	28,3	72,4	51,0	62,1	–	72,6
В сред-	66,7	56,1	26,8	72,9	47,3	64,1	65,3	64,3

нсм								
Выход мелочи <5,0 при восстановлении, %								
0–75	89,0	90,2	50,9	89,1	59,3	92,4	74,4	70,1
75–150	–	77,3	61,7	84,1	72,4	86,5	–	87,2
150–225	89,6	79,8	53,3	93,4	77,3	91,4	83,3	83,4
225–300	–	92,1	36,1	90,0	61,7	92,3	–	88,8
В сред- нем	89,3	84,9	50,5	89,2	67,7	90,7	78,9	82,4



При понижении температуры обжига прочность этих окатышей на сжатие возрастает и одновременно сокращается выход мелочи от истирания и разрушения (табл. 1.23). При дальнейшем снижении температуры обжига (до 1220–1270 °С) устойчивость верлитовых окатышей к истира-

нию вновь уменьшается и выход мелочи <0,5 мм резко возрастает. Таким

образом, в верхних горизонтах слоя высокий выход мелочи <5,0 мм для

верлитовых окатышей обусловлен повышенной хрупкостью, а в нижних горизонтах – повышенной истираемостью.

Выход мелочи <5,0 мм при испытании окатышей в барабане, как

видно из табл. 1.23, очень мало отличается от выхода мелочи <0,5 мм (ис-

ключение составляют верлитовые окатыши). Наименьший выход мелочи

<5,0 мм оказался у окатышей из руд текущей добычи, полученных из кон-

центраторов как лабораторного (1), так и промышленного обогащения (0). Истираемость окатышей для верхнего горизонта слоя оказалась низкой (1–2 %) для разновидностей концентраторов 0, 1, 2 и для всех смесей. Истираемость окатышей нижних горизонтов слоя во всех случаях выше, чем окатышей верхних горизонтов.

Данные, полученные при экспериментах с отдельными разновидностями концентраторов и их симметричными смесями, позволили записать выражения (в виде неполных кубических полиномов от содержания разновидностей в смесях), описывающие изменение того или иного показателя

качества окатышей из смесей произвольного состава. Такие выражения составлены для параметров качества, средних по всей высоте слоя, т. е. по всем четырем горизонтам, представленным в табл. 1.23. Среди них наиболее важными и поддающимися описанию выражениями указанного вида являются показатели прочности окатышей при сжатии ( $P$ ) и выход мелочи

$<5,0$  мм при испытании в барабане ( $B_{.5}$ ) и при восстановлении ( $B_{.5}$ ). Не-

полные кубические полиномы для этих показателей имеют вид

$$P = 27,0x_1 + 17,2x_2 + 3,26x_3 + 1,2x_1x_2 - 3,2x_1x_3 - 6,0x_2x_3 + 2,4x_1x_2x_3; \quad (1.14)$$

$$B_{.5} = 0,0125x_1 + 0,071x_2 + 0,026x_3 - 0,043x_1x_2 + \\ + 0,003x_1x_3 - 0,034x_2x_3 + 0,0465x_1x_2x_3; \quad (1.15)$$

$$B_{.5} = 0,85x_1 + 0,505x_2 + 0,892x_3 + 0,145x_1x_3 + 0,36x_2x_3 + 0,52x_1x_2x_3, \quad (1.16)$$

где  $x_1 + x_2 + x_3 = 100$  %.

Изменение этих показателей для окатышей из смесей произвольного состава в зависимости от соотношения отдельных разновидностей концентратов показано на рис. 1.23–1.25. Графики позволяют быстро определить (при необходимости) основные показатели качества окатышей из смеси произвольного состава.

Таким образом, результаты исследований позволяют оценивать свойства офлюсованных окатышей из разновидностей концентратов и их смесей (в произвольных пропорциях) для широкого диапазона температур обжига и выбирать для промышленного получения те из них, металлургические свойства которых выше.

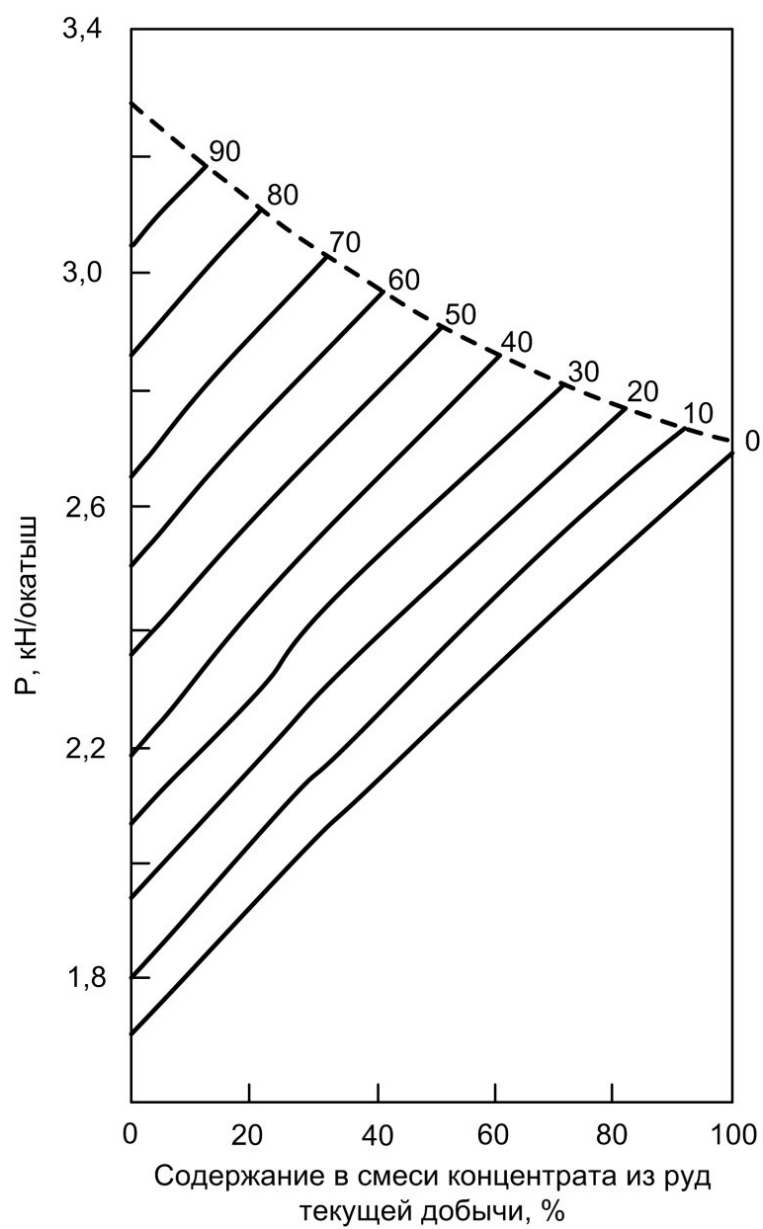


Рис. 1.23. Прочность окатышей из смеси разновидностей концентратов; числа на кривых – содержание в смеси горнблендитового концентрата, % (остальное – верлитовый концентрат)

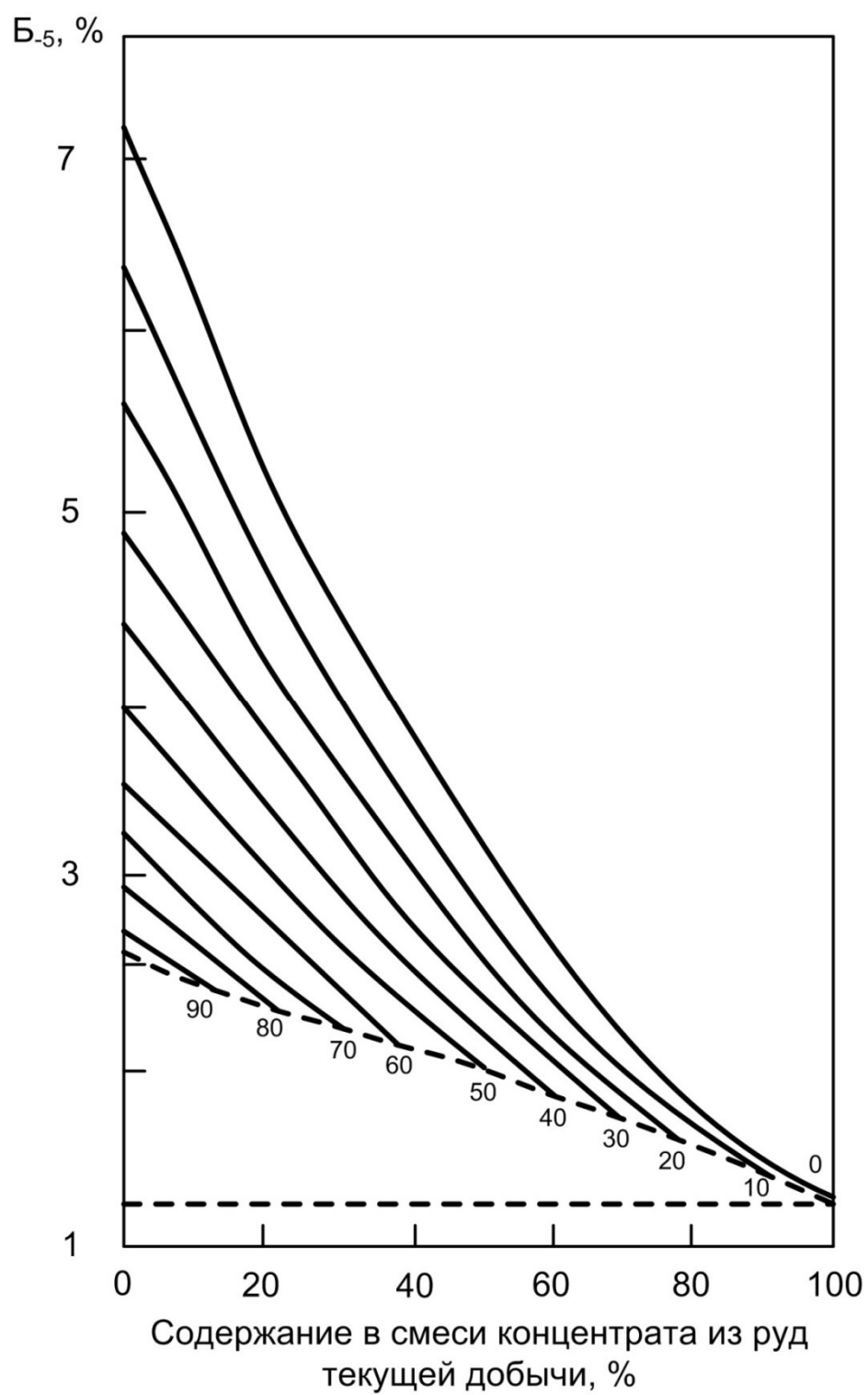


Рис. 1.24. Выход мелочи <5,0 мм при испытании в барабане окатышей

из смеси разновидностей концентратов;  
числа на кривых – содержание в смеси горнблендитового концентрата, % (остальное – верлитовый концентрат)

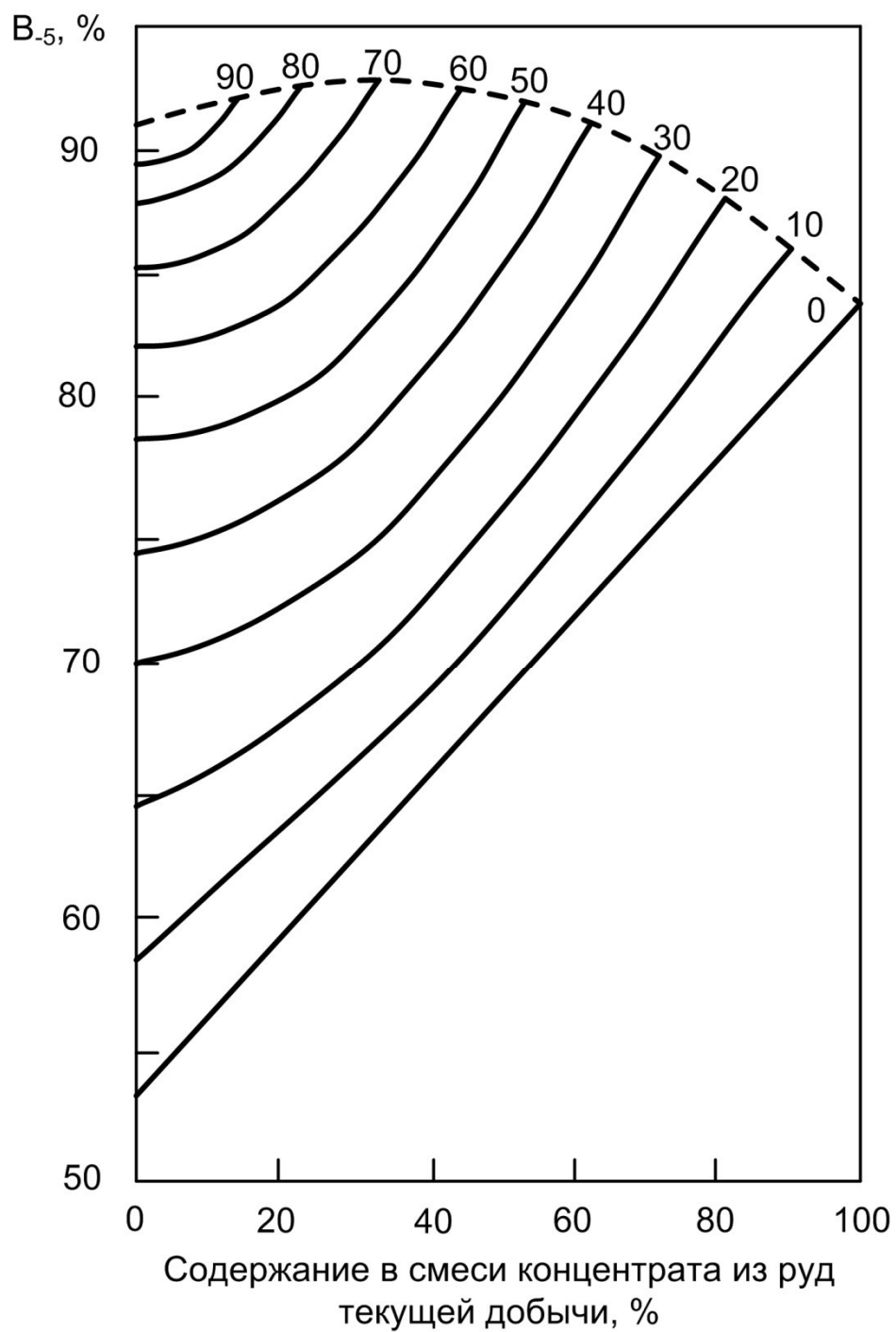


Рис. 1.25. Выход мелочи <5,0 мм при восстановлении окатышей

из смеси разновидностей концентратов;  
 числа на кривых – содержание в смеси горнблэндитового концентрата, % (остальное – верлитовый концентрат)

## 1.8. Изменение прочности железорудных окатышей в процессе термической обработки и способы ее повышения

Для получения обожженных окатышей на ленте конвейерной машины с высокими металлургическими свойствами как в исходном состоянии, так и при восстановлении в доменных печах необходимо знать влияние разных технологических факторов на их прочностные характеристики, а также механизм их разупрочнения. Исследования [36] кинетических закономерностей окисления окатышей из качканарского концентрата показали, что при скоростях нагрева  $\geq 30$  °С/мин от 500 до 1350 °С наблюдается зональный характер окисления. Поэтому необходимо было изучить влияние состава газовой фазы и степени окисления на прочность обожженных окатышей в процессе их термической обработки.

Объектом исследования служили офлюсованные окатыши диаметром 12–13 мм горно-обогачительных комбинатов Качканарского (КГОК) и Соколовско-Сарбайского (ССГОК).

Химический состав окатышей приведен в табл. 1.24.

Таблица 1.24

**Химический состав офлюсованных окатышей**

Тип окатышей	Содержание, %									
	Fe <sub>общ</sub>	FeO	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S <sub>общ</sub>	ПМПП
КГОК	57,27	23,89	4,86	2,41	2,47	3,57	2,30	0,55	0,02	4,22
ССГОК	61,05	26,35	4,85	0,80	1,03	4,18	0,17	0,08	0,48	3,91

В каждом опыте 15 окатышей помещали в ячейку из хромоникелевой проволоки. Необходимую газовую среду в печи Таманна создавали продувкой снизу через шамотную набивку определенных количеств воздуха или гелия с общим расходом 5–7 л/мин. Контролировали состав газовой среды переносным газоанализатором ГПХ–1. Прочность на сжатие обожженных окатышей определяли как среднюю из 10–12 замеров с погрешностью  $\pm 10$  % и доверительной вероятностью 80–85 %.

На рис. 1.26 показаны зависимости прочности окатышей и содержания в них FeO от окислительной выдержки при 1000 °С и температуры обжига при охлаждении на воздухе (рис. 1.26, а, б) и в нейтральной (He) среде (рис. 1.26, в, г). Как следует из рис. 1.26, а, б при термической обработке на воздухе при всех температурах обжига наблюдается увеличение прочности окатышей КГОКа и ССГОКа с увеличением окислительной выдержки. Замена окислительной среды во время охлаждения на нейтральную устраняет зависимость прочности окатышей КГОКа от длительности выдержки. В случае температур обжига 1250–1350 °С прочность составляет

2800–3000 Н/окатыш независимо от степени их окисленности (рис. 1.26, в). Незначительно изменяются прочностные характеристики окатышей ССГОКа по сравнению с охлаждением на воздухе. Повышение прочности окатышей в 1,2–1,5 раза отмечено только для 2,5- и 5,0-мин окислительной выдержки при температурах обжига 1250 и 1300 °С (рис. 1.26, з).

Содержание FeO в обожженных окатышах независимо от состава газовой среды при охлаждении уменьшается с увеличением окислительной выдержки для всех используемых температур обжига (рис. 1.26), причем для более высоких температур обжига окатышей содержание FeO в них выше. Однако при одних и тех же параметрах термообработки окатышей охлаждение в нейтральной (He) среде увеличивает содержание FeO в них по сравнению с их охлаждением на воздухе.

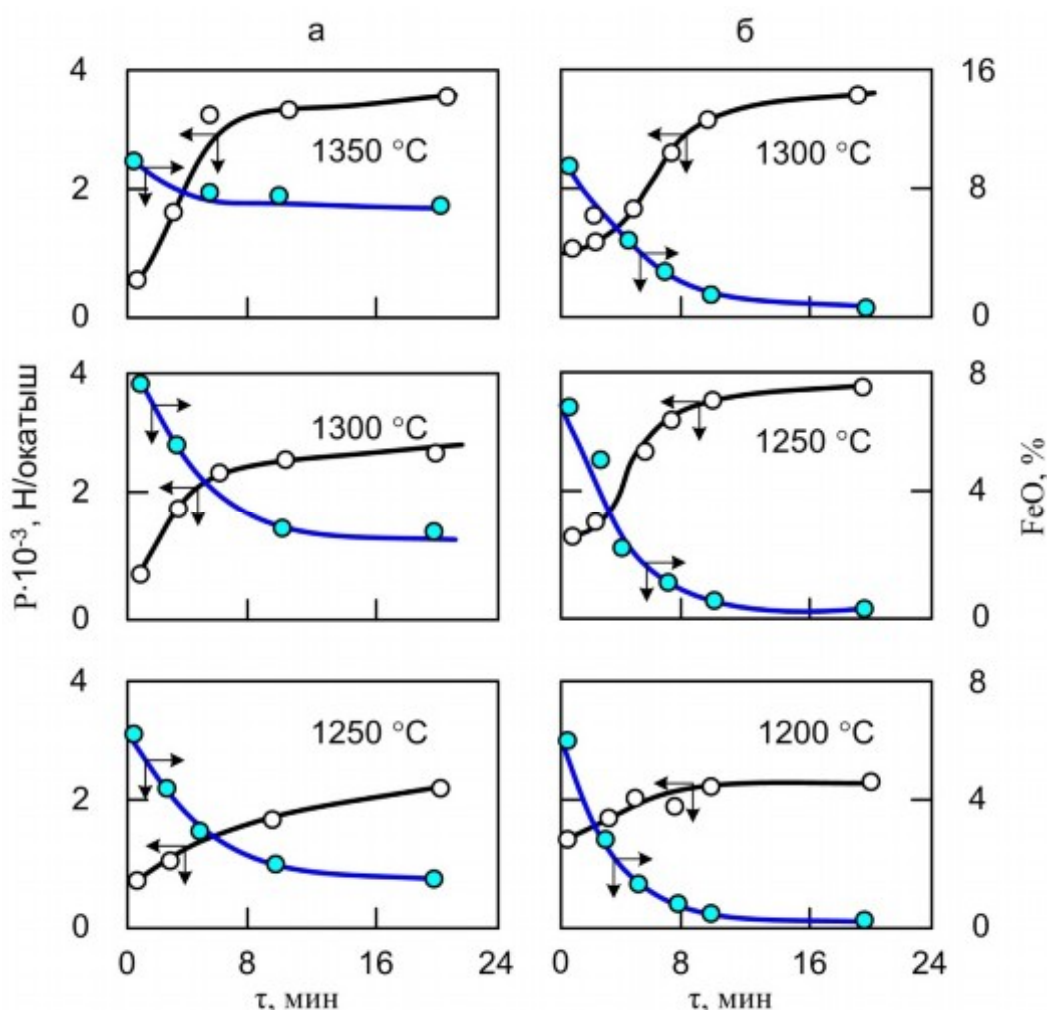


Рис. 1. 26. Влияние изотермической выдержки при 1000 °С и температуры обжига на прочность и содержание FeO в обожженных окатышах при охлаждении их на воздухе:  
а – окатыши КГОКа основностью 1,3; б – окатыши ССГОКа основностью 1,2



Изменение степени окисления окатышей изучали по диаметральному сечению обожженных окатышей на структурном анализаторе «Эпиквант». Кривые распределения степени окисления в окатышах КГОКа, обожженных при 1350 °С и охлажденных на воздухе, фиксируют неокисленные ядра диаметром 6–7 и 2,5–3,0 мм без и в результате 2,5-мин изотермической выдержки при 1000 °С соответственно. После окислительной 5- и 20-мин выдержки окатыши КГОКа оказались равномерно окислены по всему сечению. В окатышах ССГОКа, обожженных при 1300 °С и охлажденных на воздухе, неокисленные ядра диаметром 7–8, 5–6 и 3–4 мм наблюдались без и после окислительных 2,5- и 5-мин выдержек соответственно. Кривые распределения степени окисления в окатышах, обожженных при 1350 и 1300 °С и охлажденные в нейтральной (He) среде, указывают на образование поверхностных магнетитовых оболочек толщиной 1,5–2,0 мм окатышей КГОКа и 0,7–10,0 мм окатышей ССГОКа.

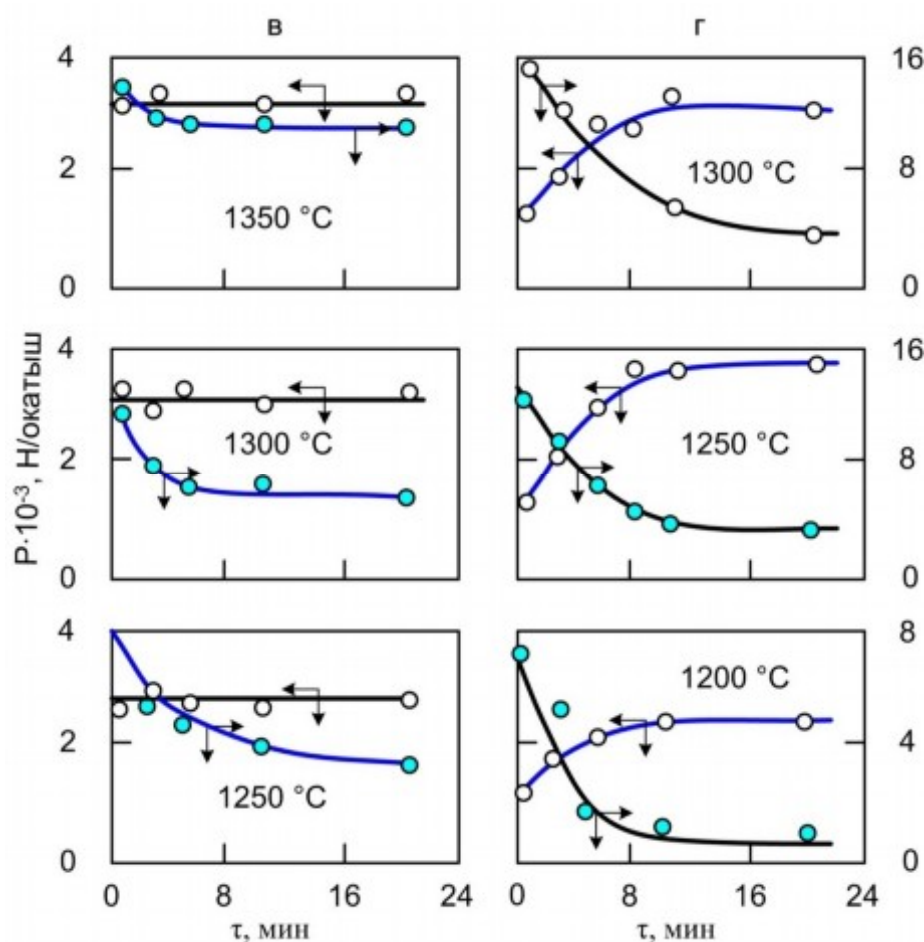


Рис. 1. 26, в, з. Влияние изотермической выдержки при 1000 °С и температуры обжига на прочность и содержание FeO в обожженных окатышах при охлаждении их в нейтральной (He) среде: в – окатыши КГОКа основностью 1,3; з – окатыши ССГОКа основностью 1,2

Данные о влиянии температуры обжига на прочность окатышей при разной длительности окисления, полученные с использованием результатов эксперимента (рис. 1.26 *а, б, в, г*), показали следующее. При окислительной выдержке 2,5 мин и более с ростом температуры обжига от 1250 до 1350 °С наблюдается увеличение прочности охлажденных на воздухе окатышей КГОКа. Прочность окатышей без предварительного окисления незначительно изменяется с увеличением температуры обжига. Увеличение температуры обжига окатышей ССГОКа без окисления и предварительно окисленных в течение 2,5 и 5,0 мин от 1200 до 1300 °С с последующим охлаждением на воздухе снижает их прочностные характеристики. Если окатыши полностью окислены при  $\tau_{1000^{\circ}\text{C}} = 20$  мин, наблюдается их упрочнение с ростом температуры обжига. Прочность окатышей, охлажденных в нейтральной (He) среде независимо от степени их предварительного окисления повышается с увеличением температуры обжига.

На микрофотографиях окатышей, предварительно окисленных при 1000 °С в течение  $\leq 5$  мин, обожженных при 1200–1350 °С и охлажденных на воздухе, были видны трещины на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки. В полностью окисленных окатышах трещины не наблюдались. Зональные окатыши КГОКа, охлажденные в нейтральной среде, не имели концентрических трещин на границе гематитовой оболочки и магнетитового ядра. В окатышах ССГОКа трещины наблюдались только в гранулах без предварительного окисления при 1000 °С. Микрофотографии поверхностной зоны окатышей КГОКа и ССГОКа, обожженных при 1350 и 1300 °С и охлажденных в нейтральной среде, свидетельствовали о наличии магнетита.

Влияние содержания кислорода в газовой фазе при обжиге на прочность окатышей изучали на офлюсованных окатышах КГОКа. Содержание кислорода в газовой фазе изменяли от 0 до 21 %. Охлаждали окатыши в нейтральной (He) среде. Результаты опытов представлены на рис. 1.27 *а, б* и рис. 1.27 *в, г*. Прочность окатышей без окислительной выдержки при 1000 °С ( $\tau = 0$ ) возрастает с увеличением окисленности газовой фазы при обжиге при 1250, 1300 °С и не изменяется при 1350 °С. Повышение прочности окатышей при окислительной выдержке 2,5 мин наблюдается с ростом содержания кислорода в газовой фазе при обжиге при всех исследуемых температурах. Увеличение степени окисленности газовой фазы при обжиге предварительно окисленных окатышах с выдержкой 5 и 20 мин способствует повышению их прочности при 1300, 1350 °С и не влияет на прочностные характеристики при 1250 °С. Содержание FeO в обожженных окатышах уменьшается с увеличением окисленности газовой фазы при обжиге, с возрастанием окислительной выдержки при 1000 °С, а также с уменьшением температуры их обжига. Полученные закономерности соответствуют диффузионному режиму процесса высокотемпературного окисления.

Частичный обжиг при 1300 °С и охлаждение в нейтральной (He) среде повышает прочность офлюсованных окатышей ССГОКа до 2300 Н/окатыш и устраняет зависимость ее от окислительной выдержки при 1000 °С. Прочность офлюсованных окатышей КГОКа и ССГОКа, частично обожженных в нейтральной среде при 1300 °С и охлажденных на воздухе, повышается с 400–800 до 2500–2800 Н/окатыш при увеличении окислительной выдержки от 0 до 10 мин.

На прочностные характеристики обожженных окатышей влияет и скорость их охлаждения [36, 37]. Офлюсованные окатыши КГОКа и ССГОКа с разной степенью окисленности ( $\tau_{1000^\circ\text{C}} = 0\text{--}10$  мин), обожженные на воздухе при 1300 °С в течение 6 мин, охлаждали на воздухе и в нейтральной (He) среде со скоростями 0,8, 1,7, и 4,2 °С/с. Полученные результаты представлены в табл. 1.25, из которой следует, что с увеличением скорости охлаждения обожженных окатышей на воздухе в интервале 0,8–4,2 °С/с наблюдается повышение в них содержания FeO, а в случае охлаждения в нейтральной газовой среде содержание FeO в окатышах практически не меняется.

Таблица 1.25

**Прочность, кН/окатыш (числитель), качканарских (соколовско-сарбайских) окатышей и содержание в них FeO, % (знаменатель), при разных скоростях охлаждения**

Выдержка при 1000 °С, мин	Охлаждающая среда	Окатыши КГОК			Окатыши ССГОК		
		Скорость охлаждения, °С/с					
		0,85	1,70	4,20	0,85	1,70	4,20
0,0	Воздух	$\frac{0,50}{10,00}$	$\frac{0,60}{10,00}$	$\frac{0,40}{11,90}$	$\frac{1,00}{10,90}$	$\frac{0,80}{11,84}$	$\frac{0,74}{12,66}$
2,5	То же	$\frac{1,00}{2,40}$	$\frac{1,35}{3,90}$	$\frac{0,57}{7,04}$	$\frac{1,56}{7,00}$	$\frac{1,40}{8,52}$	$\frac{0,78}{11,24}$
5,0	»	$\frac{1,90}{3,67}$	$\frac{1,65}{4,14}$	$\frac{1,27}{5,92}$	$\frac{1,65}{5,00}$	$\frac{1,87}{6,04}$	$\frac{0,86}{8,23}$
10,0	»	$\frac{2,00}{2,93}$	$\frac{2,00}{2,43}$	$\frac{1,27}{4,14}$	$\frac{2,90}{2,50}$	$\frac{2,07}{1,78}$	$\frac{1,95}{4,80}$
0,0	Гелий	$\frac{1,94}{13,34}$	$\frac{2,03}{12,55}$	$\frac{1,58}{13,74}$	$\frac{2,26}{17,00}$	$\frac{1,63}{16,70}$	$\frac{1,38}{16,50}$
2,5	То же	$\frac{1,93}{10,15}$	$\frac{2,08}{9,70}$	$\frac{2,04}{9,94}$	$\frac{2,02}{15,40}$	$\frac{1,90}{15,00}$	$\frac{1,34}{14,56}$
5,0	»	$\frac{2,31}{8,94}$	$\frac{2,24}{7,69}$	$\frac{2,78}{8,17}$	$\frac{1,68}{12,20}$	$\frac{1,93}{12,43}$	$\frac{2,10}{11,60}$
10,0	»	$\frac{1,85}{7,46}$	$\frac{2,40}{7,51}$	$\frac{2,64}{7,00}$	$\frac{2,64}{11,30}$	$\frac{2,70}{9,26}$	$\frac{2,70}{9,70}$

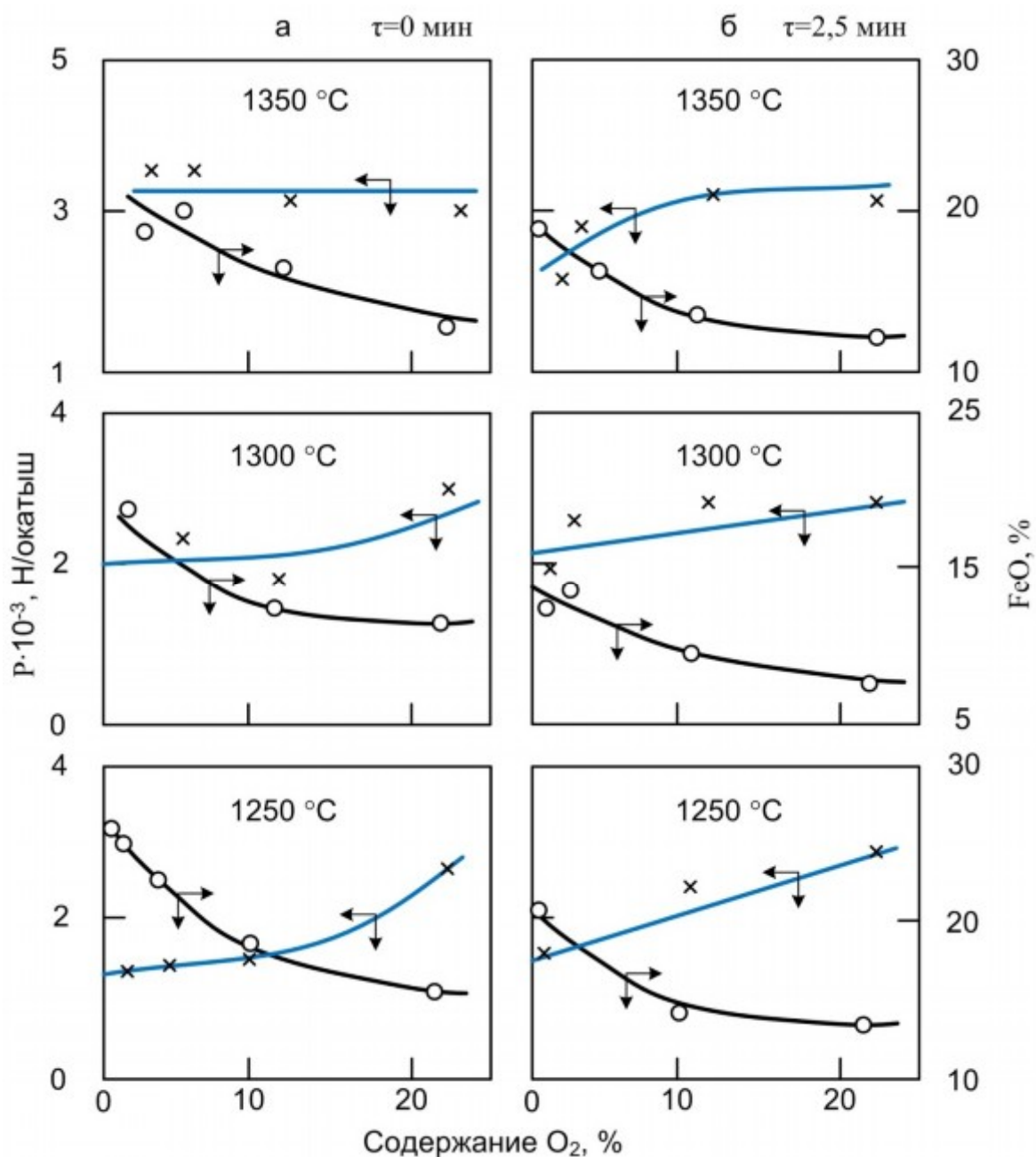


Рис. 1. 27, а, б. Зависимость прочности окатышей КГОКа основностью 1,3 и содержания FeO от содержания кислорода в газовой фазе при разных температурах обжига (охлаждение окатышей в нейтральной среде) и окислительных выдержках  $\tau$  при 1000 °C:  
а –  $\tau = 0$  мин; б –  $\tau = 2,5$  мин

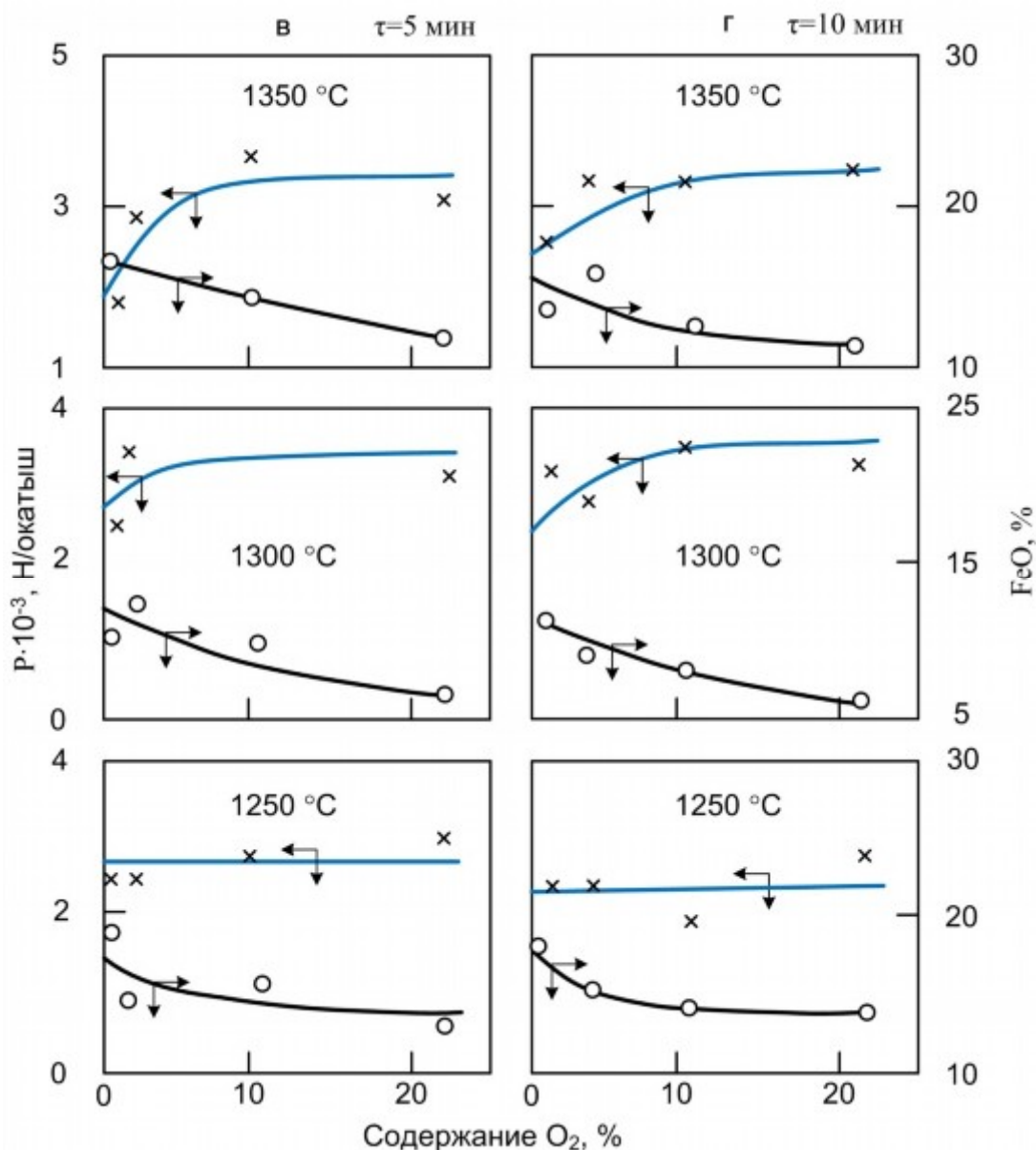


Рис. 1. 27 в, г. Зависимость прочности окатышей КГОКа основностью 1,3 и содержания FeO от содержания кислорода в газовой фазе при разных температурах обжига (охлаждение окатышей в нейтральной среде) и окислительных выдержках  $\tau$  при 1000 °C:  
в –  $\tau = 5$  мин; г –  $\tau = 10$  мин

Прочность обожженных окатышей без предварительного окисления не меняется от скорости охлаждения на воздухе и составляет 500 и 900 Н/окатыш. Увеличение окислительной выдержки до  $\geq 2,5$  мин способствует повышению прочности обожженных окатышей, однако с увеличением скорости охлаждения окатышей на воздухе наблюдается уменьшение их прочности.

Охлаждение окатышей, окисленных при 1000 °С в течение  $\leq 2,5$  мин в нейтральной среде, способствует увеличению их прочности до 1500–2000 Н/окатыш. Однако с увеличением скорости охлаждения от 0,8 до 4,2 °С/с прочность окатышей несколько уменьшается. Увеличение скорости охлаждения полностью окисленных перед обжигом окатышей КГОКа ( $\tau_{1000^\circ\text{C}} = 5$  и  $\leq 10$  мин) способствует небольшому увеличению их прочности. Прочность полностью окисленных окатышей ССГОКа ( $\tau_{1000^\circ\text{C}} = 10$  мин) не меняется с ростом скорости их охлаждения.

На прочность обожженных окатышей влияют условия их охлаждения в интервале 1350–900 °С [37]. Изучалось влияние охлаждения зональных офлюсованных окатышей КГОКа ( $\tau_{1000^\circ\text{C}} = 0$  мин), обожженных при 1300 °С на воздухе от 900 °С со скоростями 0,3; 1,7; 3,3 и 5,0 °С/с, на их прочность. В интервале 1300–900 °С обожженные окатыши охлаждали со скоростью 1,7 °С/с на воздухе и в нейтральной (He) среде. Результаты опытов показали, что с увеличением скорости охлаждения от 0,3 до 5,0 °С/с прочность окатышей практически не менялась. Замена окислительной среды на нейтральную при охлаждении в интервале 1300–900 °С способствует увеличению прочности обожженных окатышей с 700–800 до 1950–2100 Н/окатыш при повышении содержания FeO в них от 7,0–7,8 до 13,3–13,8 %.

Полученные результаты исследований влияния технологических факторов на прочность обожженных офлюсованных окатышей КГОКа и ССГОКа показали: низкие прочностные свойства имеют, как правило, частично окисленные окатыши, имеющие зональное строение и охлажденные на воздухе. Невысокая прочность таких окатышей связана с наличием в них трещин на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки [38].

Если допустить, что трещины образуются при обжиге офлюсованных окатышей в результате разной скорости усадки гематитовой оболочки и магнетитового ядра [39] или в результате давления газообразных продуктов (паров воды или диоксида углерода), образующихся при термическом разложении частиц известняка и силикатных фаз в ядре окатыша, отвод которых через наружную оболочку затруднен, то при последующем охлаждении трещиноватая структура окатышей не должна измениться. Однако при охлаждении обожженных окатышей в нейтральной среде в них наблюдались только небольшие нитевидные трещины, не нарушающие сплошности структуры. При этом прочность офлюсованных окатышей КГОКа увеличивалась в 4–5 раз, а окатышей ССГОКа – в 1,2–1,5 раза по сравнению с охлажденными на воздухе (рис. 1.26), свидетельствуя о разупрочнении зональных окатышей при охлаждении в окислительной среде.



По мнению авторов [40], разупрочнение гематито-магнетитовых окатышей при охлаждении связано с возникновением в них термических напряжений в результате изменения закона распределения температур после перехода окатышей из пластического состояния в упругое, которое в зависимости от их состава наблюдается при  $t \leq 1000$  °С, а термические напряжения в окатышах возрастают при увеличении скорости их охлаждения. Показано [38], что прочность зональных окатышей определяется содержанием кислорода в газовой фазе при охлаждении окатышей в диапазоне 1300–900 °С. Разупрочнение обожженных зональных окатышей при охлаждении на воздухе связано с окислением в них остаточного магнетита, в результате которого рудные зерна уменьшаются и отслаиваются от шлаковой связки.

Для проверки этой гипотезы на высокотемпературном микроскопе МНО-2 были проведены эксперименты с рудными зернами ольховского магнетита и качканарского титаномагнетита крупностью 0,1–0,3 мм. В ходе термической обработки зерен на воздухе фиксировали изменение их размеров. Оказалось, что ход кривых и количественные характеристики изменения размеров идентичны таковым при термическом расширении магнетита в инертной среде [41]. Следовательно, замена магнетита на гематит не приводит к заметным изменениям размеров частиц. Их структура остается довольно плотной до и после окислительного обжига, свидетельствуя, что кристаллохимическое превращение магнетит → гематит не приводит к уменьшению рудных зерен.

Однако при нагреве на воздухе брикетов из зерен ольховского магнетита и качканарского титаномагнетита крупностью 50–74 мкм в тех же условиях термообработки значительно уменьшились размеры образцов в ходе высокотемпературного обжига и охлаждения, что возможно только в результате их жидкофазного спекания [39]. Наблюдаемая усадка брикетов при охлаждении в интервале 1300–1100 °С связана, вероятно, с уменьшением объема шлаковой связки при ее кристаллизации.

С целью проверки высказанного предположения на высокотемпературном микроскопе МНО-2 фиксировали изменение размеров окисленных и неокисленных брикетов из офлюсованного до основности 1,3 качканарского концентрата в ходе охлаждения. Схема опытов включала нагрев брикетов со скоростью 0,17 °С/с до 1300 °С, обжиг и охлаждение со скоростью 0,83 °С/с. Длительность обжига составляла 20–25 мин для проведения частичного спекания образцов до такой степени, чтобы при охлаждении брикета изменения его размеров за счет спекания были незначительными по сравнению с изменениями размеров брикета в результате фазовых превращений шлаковых составляющих исследуемых образцов. Для моделирования усадки магнетитового ядра при охлаждении зональных окатышей

термическую обработку титаномагнетитового брикета проводили в нейтральной среде. В случае моделирования усадки гематитовой оболочки зонального окатыша термическую обработку брикета проводили в окислительной среде. Результаты экспериментов представлены на рис. 1.28.

Для окисленного обожженного брикета (рис. 1.28, кривая 1) наблюдается интенсивная усадка при уменьшении температуры от 1250 до 1180 °С, небольшое увеличение размера в интервале 1180–1050 °С и уменьшение размера при охлаждении до 700 °С. Наблюдаемое уменьшение линейных размеров исследуемого образца в интервале 1250–1180 °С можно связать с кристаллизацией его шлаковой связки. Небольшое увеличение размера брикета при дальнейшем его охлаждении вызвано незначительным растрескиванием брикета в результате возникновения внутренних напряжений после кристаллизации шлаковой связки. Уменьшение линейных размеров брикета при охлаждении от 1050 °С соответствует его термической усадке после перехода в упругое состояние.

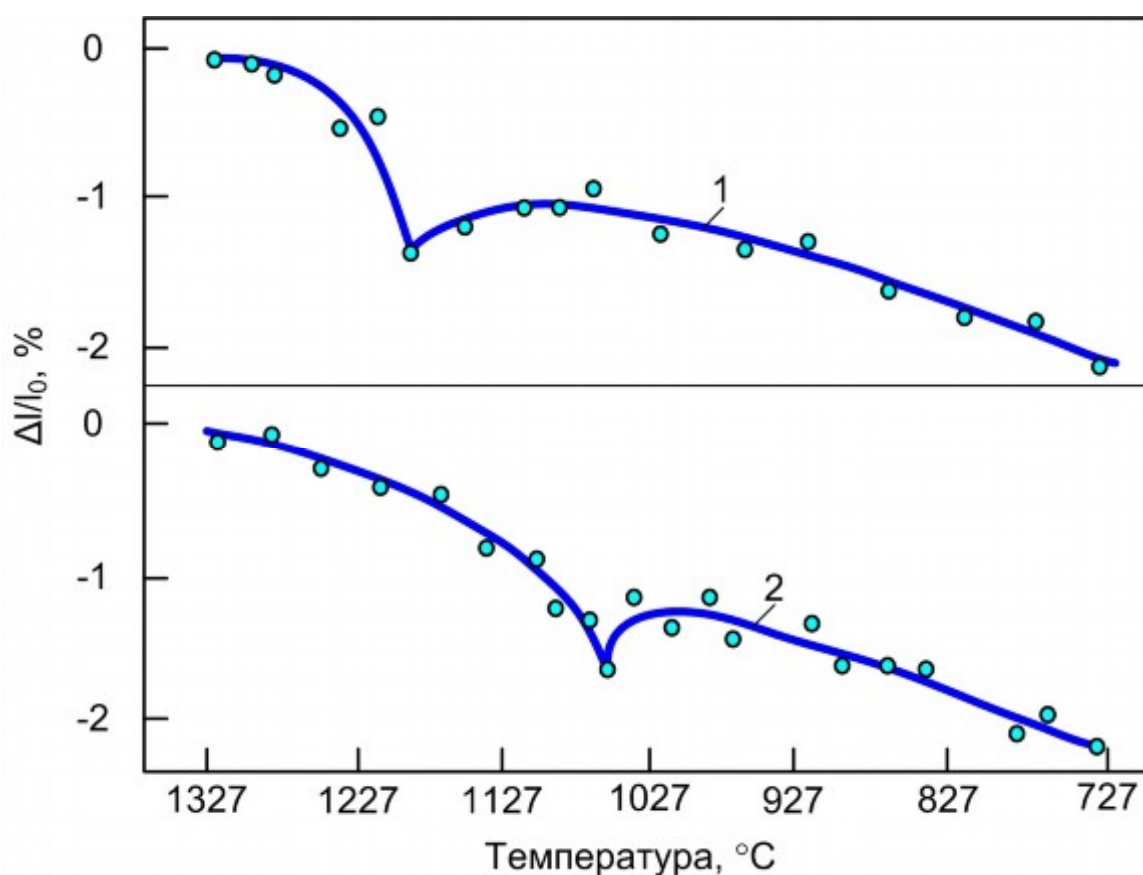


Рис. 1. 28. Зависимость линейных размеров брикетов основностью 1,3 из титаномагнетитового концентрата КГОКа от температуры в ходе охлаждения со скоростью 0,83 °С/с:  
1 – нагрев, обжиг и охлаждение на воздухе;



2 – нагрев, обжиг и охлаждение в нейтральной атмосфере

При охлаждении неоокисленного брикета из офлюсованного титаномагнетитового концентрата, обожженного в нейтральной среде, наблюдается усадка в интервале 1300–1050 °С, небольшое разбухание при 1050–1000 °С и уменьшение размеров при охлаждении до 700 °С (рис. 1.28, кривая 2). Обжиг офлюсованного титаномагнетитового концентрата в нейтральной среде, в отличие от окислительной, способствует формированию шлаковых расплавов с большим содержанием FeO и силикатной фазы в них, температурный интервал отвердевания которых при охлаждении в нейтральной среде увеличивается и смещается в область более низких температур [38]. Поэтому усадку неоокисленного брикета при охлаждении в интервале 1300–1050 °С также можно объяснить уменьшением объема шлаковой связки брикета при ее отвердевании.

Для подтверждения этого предположения экспериментально определили зависимость деформации окисленных и неоокисленных брикетов от ее длительности при изотермических условиях под действием постоянной нагрузки. Полученные результаты позволили рассчитать эффективную динамическую вязкость исследуемых материалов при разных температурах. Эксперименты проводили с офлюсованными до основности 1,3 брикетами из качканарского титаномагнетитового концентрата. На рис. 1.29 представлены зависимости логарифма эффективной динамической вязкости брикетов от температуры в области 900–1300 °С для образцов, обожженных в нейтральной среде (кривая 1) и на воздухе (кривая 2). При снижении температуры от 1300 до 1150 °С наблюдается резкое увеличение логарифма вязкости окисленного брикета от 9,4 до 12,1. Дальнейшее снижение температуры от 1150 до 1000 °С практически не меняет вязкость окисленного материала [42]. Логарифм вязкости неоокисленного материала изменяется от 9,5 до 12,5 при снижении температуры от 1270 до 1030 °С и далее остается практически неизменным.

Резкое увеличение вязкости окисленного и неоокисленного брикетов из офлюсованного качканарского концентрата при уменьшении температуры в интервале 1300–1030 °С связано с кристаллизацией расплавов шлаковых составляющих концентрата. Сопоставление полученных результатов показало, что эффективная вязкость исследуемых образцов при соответствующей температуре отличается на порядок, а конечные температуры кристаллизации шлаковых связок окисленного и неоокисленного материалов приблизительно равны 1150 и 1030 °С.

Сопоставление опытных данных, представленных на рис. 1.28 и 1.29, позволяет сделать вывод, что уменьшение линейных размеров окисленного и неоокисленного брикетов из офлюсованного качканарского концентрата при их охлаждении в интервале 1330–1050 °С связано с уменьшением объема шлаковых составляющих при их кристаллизации. Более широкий тем-

пературный интервал изменения размера брикета из неоокисленного материала показывает, что при охлаждении зональных окатышей возможно возникновение напряженного состояния на границе неоокисленного ядра и окисленной оболочки за счет их разной усадки.

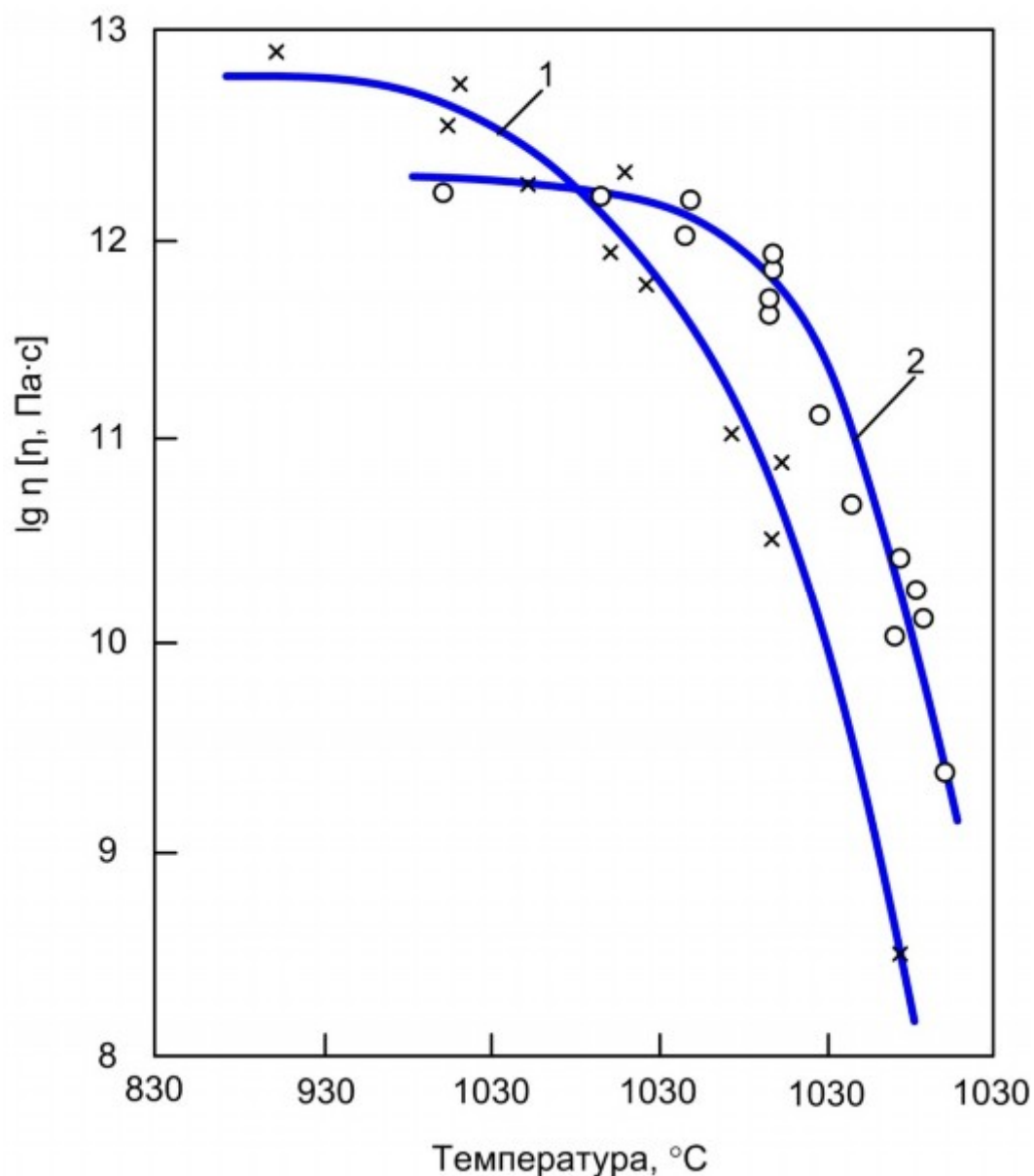


Рис. 1. 29. Зависимость логарифма вязкости брикетов основностью 1,3 из качканарского титаномагнетитового концентрата от температуры:  
1 – неоокисленный концентрат; 2 – окисленный концентрат

Таким образом, изучено влияние на прочностные характеристики обожженных офлюсованных окатышей КГОКа и ССГОКа температуры обжига, длительности окислительной выдержки, состава газовой среды,

скоростей нагрева и охлаждения окатышей. Предложен механизм разупрочнения зональных обожженных окатышей, основанный на возникновении при охлаждении напряженного состояния на границе зон из неокисленного магнетитового ядра и окисленной гематитовой оболочки, характеризующиеся разными усадкой и температурами кристаллизации шлаковых включений. Полученные результаты позволяют рекомендовать режимные параметры термообработки окатышей на ленте конвейерной машины и получать окатыши с высокими прочностными характеристиками.

### **1.9. Разработка технологии доменной плавки на железорудном сырье с различной основностью**

Увеличение содержания окатышей в шихте доменных печей требует повышения их прочности как в исходном состоянии, так и при восстановлении. В связи с этим сотрудниками института «Уралмеханобр» и Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина были проведены исследования с целью разработки технологии доменной плавки на качканарском железорудном сырье смешанной основности [43]. Изучали зависимость структуры и металлургических свойств окатышей и агломерата от их основности, от состава газовой среды и от содержания топлива в шихте. Оценили металлургические свойства агломерата и окатышей разной основности в интервале температур пластично-вязкого и жидкого состояний, а также обосновали выбор состава шихты и основности компонентов.

Обжиг предварительно подсушенных окатышей основностью 0,3; 0,7 и 1,25 и спекание качканарских концентратов проводили на установке типа аглочаша. Прочность оценивали в мини-барабане, а при восстановлении – в установке Линедра. Минералогический анализ проводили для окатышей среднего слоя, их восстанавливали в дериватографе при нагревании со скоростью 10 °C/мин до 1000 °C в газе, по составу близком к имеющемуся в средних горизонтах доменной печи.

В ходе исследований установили, что неофлюсованные окатыши имеют прочность в исходном состоянии в 1,5–1,7 раза большую, чем офлюсованные с основностью 0,7–1,2, и практически не разрушаются при восстановлении (рис. 1.30, 1.31). Частично окисленные неофлюсованные окатыши независимо от режима их обжига сохраняют высокую прочность. В то же время для получения прочных в исходном состоянии и при восстановлении офлюсованных окатышей необходимо их предварительно окислить с последующим обжигом с частичной диссоциацией гематита. Учитывая высокий уровень металлургических свойств неофлюсованных ока-

тышей, а также близкую к офлюсованным степень восстановления, достигаемую в среднем и нижнем горизонтах, можно рекомендовать их использование в печах, если плавка вместе с агломератом не вызовет отрицательного воздействия на футеровку печи и не приведет к существенному падению газопроницаемости зоны вязкопластичного состояния шихты. Для оценки указанных явлений необходимо подобрать основность агломерата, позволяющую исключить ввод в печь большого количества известняка и оценить свойства шихты в условиях температур перехода из упругого состояния в пластичное.

Установлено также, что наилучшими металлургическими свойствами обладает агломерат основностью 2,0–2,3 (рис. 1.32). Для спекания шихта должна содержать 4,0 % С при высоте слоя 330 мм, чтобы обеспечить содержание монооксида железа 11,0–11,5 %. Также агломерат должен иметь прочность при восстановлении по выходу крупных классов ( $> 10$  мм) в 3–5 раз большую, чем производимый в настоящее время с основностью 1,3 (табл. 1.26). Ферритная связка обеспечивает высокую восстановимость агломерата основностью 2,0–2,3. Для обеспечения требуемой основности доменного шлака агломерат должен проплавляться в смеси с неофлюсованными окатышами. При использовании на НТМК только качканарского сырья соотношение масс окатышей и агломерата в шихте доменных печей составит 3:2 (табл. 1.27).

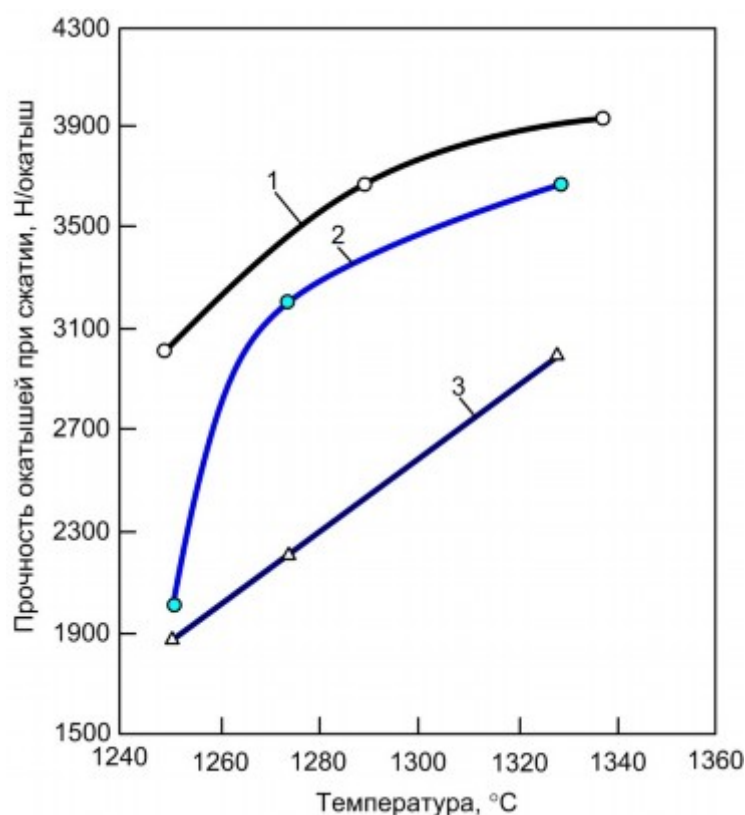


Рис. 1. 30. Влияние температуры обжига на прочность

при сжатии окатышей с основностью:

1 – 0,3; 2 – 0,7; 3 – 1,2

Интенсификация плавки с использованием малоосновных окатышей и высокоосновного агломерата, содержащих амфотерные оксиды, вызовет расширение зоны потока шихты в нижней части шахты и заплечиков. Как показали проведенные на Магнитогорском металлургическом комбинате опытные плавки, применение никзоосновных окатышей с низкой разрушаемостью при восстановлении, расширение зоны потока шихты в нижней части шахты и заплечиков приводит к росту бокового давления шихты в этой зоне, что способствует ускорению износа футеровки и холодильников.

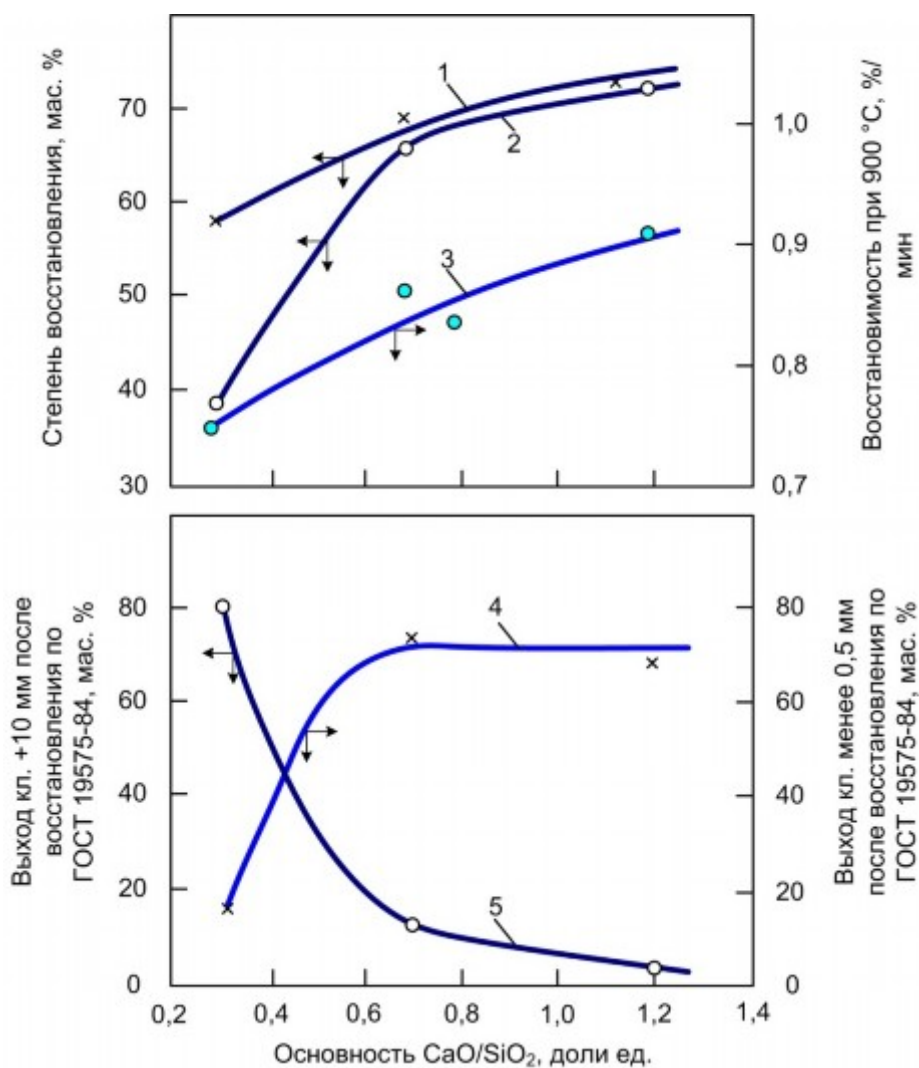


Рис. 1. 31. Влияние основности окатышей на их восстановимость (а) и разрушение при их восстановлении (б):

- 1 – восстановление в дериватографе газом, состоящим из 90 % CO и 10 % CO<sub>2</sub> при нагреве до 1000 °C; 2, 4, 5 – испытание в установке Линдера по ГОСТ 19576–84;  
2 – зависимость степени восстановления агломерата от основности;  
4 – зависимость выхода класса фракции <0,5 мм в навеске агломерата от основности;

5 – зависимость выхода класса фракции >10 мм после восстановления;  
 3 – восстановление горновым газом при 900 °С

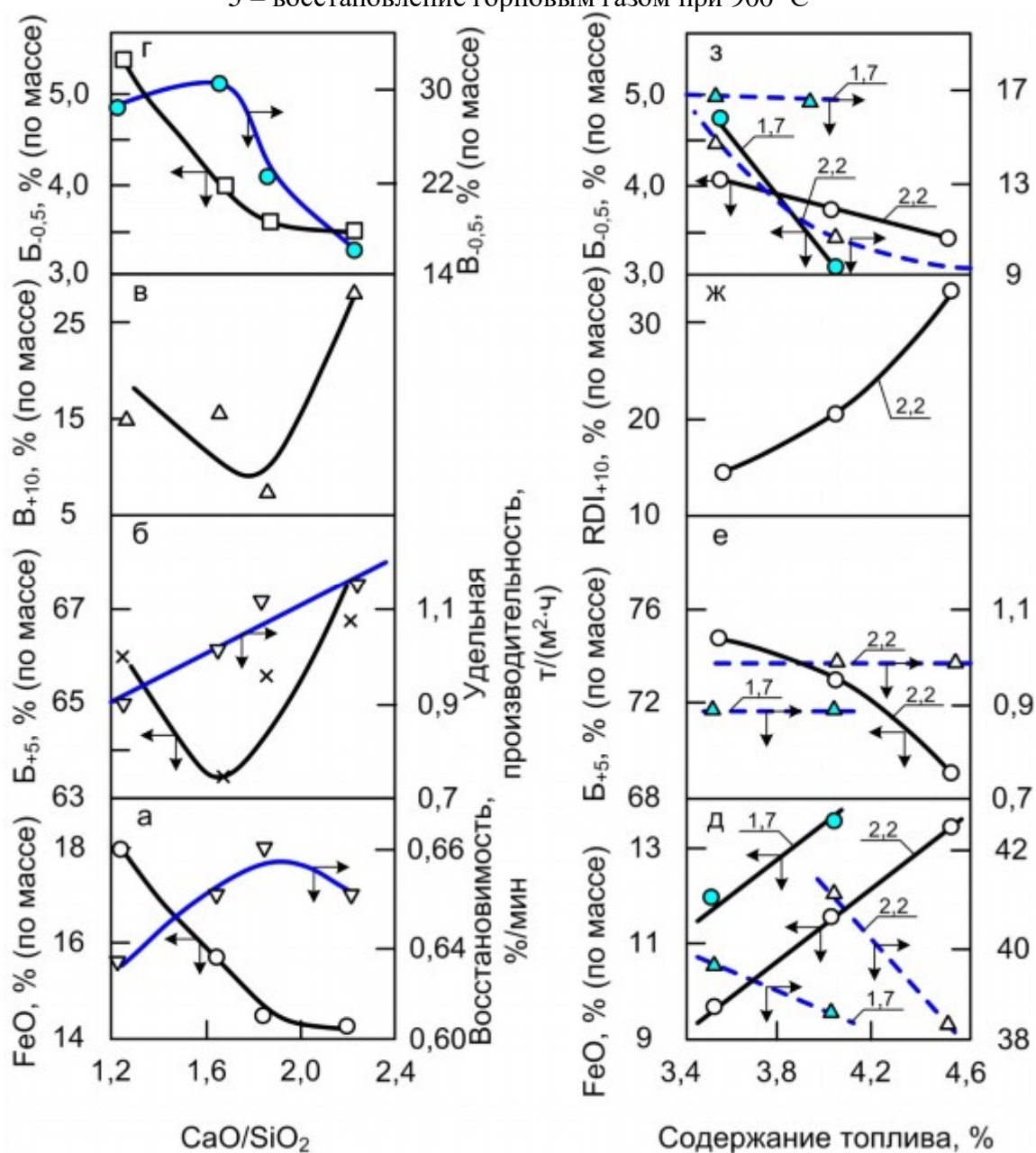


Рис. 1. 32. Влияние основности и содержания топлива в шихте на металлургические свойства качканарских агломератов:  
 а–г – содержание топлива 4,5 %, высота слоя 300 мм;  
 д–з – то же, высота слоя 330 мм, 1,7 и 2,2 – основности агломерата,  
*RDI* – показатель прочности в процессе восстановления  
 (*Reduction Degree Index*)

Таблица 1.26

**Влияние содержания твердого топлива в шихте на показатели процесса спекания и качество агломерата разной основности при высоте слоя 330 мм**

Показатели	Основность агломерата				
	1,7		2,2		
	Содержание углерода в шихте, %				
	3,5	4,0	3,5	4,0	4,5
Вертикальная скорость спекания, мм/мин	14,9	15,3	15,9	16,5	16,5
Удельная производительность, т/(м <sup>2</sup> ч)	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0
Гранулометрический состав, %, по классам, мм:					
> 40	10,9	18,7	10,0	11,3	17,5
25–15	15,9	23,3	23,3	24,8	24,4
5–0	23,3	17,7	22,2	17,2	17,4
Химический состав, %:					
FeO	12,1	13,7	9,8	11,8	13,5
Fe <sub>общ</sub>	55,2	54,4	53,3	53,0	52,7
S <sub>общ</sub>	0,008	0,008	0,009	0,011	0,038
Прочность по ГОСТ 15137–77, %:					
B <sub>&gt;5</sub>	68,3	74,7	74,9	73,0	69,3
B <sub>&lt;0,5</sub>	4,7	3,0	4,0	3,7	3,4
Прочность при восстановлении, % по ГОСТ 19574–84					
B <sub>&gt;10</sub>	3,7	6,5	–	13,0	22,9
B <sub>&lt;0,5</sub>	35,2	35,0	–	24,1	20,4
по ГОСТ 27446–87*:					
RDI <sub>&gt;6,3</sub>	–	12,6	28,5	39,7	56,5
RDI <sub>&gt;3,15</sub>	45,6	39,5	55,1	67,4	75,4
RDI <sub>&lt;0,5</sub>	16,9	16,7	14,8	10,8	9,4
Степень восстановления по ГОСТ 19575–81, %	39,6	38,7	–	41,2	38,4

\* *RDI* – показатель прочности в процессе восстановления (*Reduction Degree Index*)

Таблица 1.27

**Химический состав шихтовых материалов и расчетный состав  
окатышей и агломератов для получения в доменной плавке шлака  
с основностью 1,13–1,14 %**

Со- дер- жание	Содержание, %								
	Концентрат		Бенто- нит	Из- вест- няк	Зола		Ока- ты- ши	Агломерат основностью	
	ока- ты- шей	агломе- рата			кокси- ка	антра- цита		1	2
Fe	62,3	60,4	0,9	0,3	14,4	10,6	60,4	55,14–55,04	54,30–54,23
FeO	28,1	–	–	–	–	–	2,4	14,30	14,10
CaO	1,2	2,0	3,6	54,0	9,3	7,6	1,2	9,25–9,40	10,53–10,63
SiO <sub>2</sub>	3,5	5,1	60,0	1,6	40,9	49,3	4,0	5,35–5,36	5,32–5,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,3	2,7	14,8	0,5	21,8	21,0	2,4	2,80	2,80
MgO	2,4	3,0	2,9	0,6	4,4	2,7	2,4	2,90	2,80
MnO	0,4	0,2	–	–	1,4	1,2	0,3	0,18	0,18
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,6	0,6	–	–	–	–	0,6	0,51	0,51
TiO <sub>2</sub>	2,6	2,6	–	–	–	–	2,6	2,35–2,36	2,32
CaO/ SiO <sub>2</sub>	3,3	0,4	–	–	–	–	0,3	1,73–1,76	1,98–2,00

Для того чтобы предотвратить смывание гарниссажа на футеровке заплечиков увеличенным потоком шихты, предлагается поддерживать угол наклона перевернутого конуса футеровки заплечиков на 0,5–1,0 град меньшим, чем угол наклона шахты. В этом случае сохраняется требуемая крутизна излома потока шихты при переходе из зоны восстановления в зону плавления. Возникающее сопротивление движению шихты способствует образованию гарниссажа на футеровке заплечиков. Указанные пределы изменения углов наклона шахты и заплечиков обоснованы опытом эксплуатации доменных печей НТМК и ММК с переменным углом наклона профиля футеровки печей.

Таким образом, применение низкоосновных окатышей и высокоосновного агломерата, слабо разрушающихся при восстановлении, обеспечивает высокую газопроницаемость в верхних горизонтах доменной печи. Наличие амфотерных оксидов титана и алюминия в качканарских агломерате и окатышах, а также понижение угла наклона шахты предотвращает раннее слипание шихтовых материалов в нижних горизонтах печи, что обеспечивает ровный сход шихты, высокую степень использования восстановительного потенциала газа и соответственно повышение произ-



водительности печи и снижение расхода кокса. Выбор углов наклона к горизонту футеровки шахты и заплечиков позволяет сохранить стойкость огнеупорной футеровки на уровне, достигнутом при работе на сырье с одинаковой основностью.

Результаты проведенной работы позволили обосновать возможность совместной плавки в доменной печи неофлюсованных окатышей в количестве 50–70 % в смеси с агломератом основностью 2,0–2,3. Разработан также новый способ доменной плавки сырья с разной основностью, содержащего 3,5–5,0 % амфотерных оксидов титана и алюминия, позволяющий повысить технико-экономические показатели работы печей.

### **1.10. Совершенствование методики определения показателей комкуемости железорудных концентратов**

Производство железорудных окатышей связано с формированием сырых окатышей и их последующей термообработкой в обжиговых агрегатах. Сырые окатыши получают путем окомкования шихты (концентрат с соответствующими добавками) в тарельчатых или барабанных грануляторах. Изменение влажности окатышей оказывает существенное влияние на их свойства. Оптимальное содержание влаги в окатышах выбирают с таким расчетом, чтобы обеспечить наиболее благоприятное сочетание прочности окатышей на раздавливание и на удар, максимальную их однородность по крупности и наибольшую производительность окомкователя. Уровень оптимальной влажности шихты при окомковании зависит от свойств ее составляющих и определяется оптимальными условиями образования окатышей с требуемыми физико-химическими свойствами. Сырые окатыши должны выдерживать значительные перегрузки при транспортировке их к обжиговому агрегату и давление вышележащих слоев во время обжига. Оптимальное содержание влаги для различных шихт разное и определяется экспериментально по существующим методикам на лабораторных установках.

Такую же важную роль играет определение оптимальной влажности при окомковании агломерационных шихт, от нее зависят газопроницаемость слоя шихты на аглоленте, основные параметры процесса спекания и качество агломерата.

Железные руды и полученные из них концентраты характеризуются неодинаковой способностью образовывать прочные гранулы в процессе окомкования, т. е. обладают различной комкуемостью [44–46]. Методика определения показателей комкуемости дисперсных материалов приведена в работах [47, 48]. Она включает экспериментальное определение максимальной гигроскопической (МГВ), максимальной капиллярной (МКВ)

и наименьшей капиллярной (НКВ) влагоемкостей, по которым расчетом получают значения показателя относительной комкуемости ( $K$ ) и оптимальной влажности окомкования  $W_{\text{опт}}$ :

$$K = (НКВ - МГВ) / (МКВ - НКВ); \quad (1.17)$$

$$W_{\text{опт}} = НКВ + (НКВ - МГВ)(1 - K)^2. \quad (1.18)$$

Определение МКВ и НКВ производят путем построения линейной зависимости влагоемкости ( $W$ ) материала от коэффициента скорости капиллярной пропитки ( $K_{\text{скп}}$ ), который входит в известное уравнение

$$V^2 = \tau K_{\text{скп}}, \quad (1.19)$$

где  $V$  – объем впитанной жидкости;

$\tau$  – продолжительность пропитки.

При этом величине МКВ соответствует влагоемкость материала при  $K_{\text{скп}} = \max$ , а величине НКВ – влагоемкость, которую определяют путем экстраполяции зависимости  $W = f(K_{\text{скп}})$  при  $K_{\text{скп}} = 0$ . Обычно материал хорошо комкуется, если  $K = 0,6-0,8$ . При этом очевидно, что капиллярная влагоемкость материала зависит от его насыпной плотности и изменяется от НКВ при наибольшей плотности до МКВ при наименьшей.

Целью настоящего исследования [49] является экспериментальная оценка точности определения показателей комкуемости по существующей методике и дальнейшее усовершенствование последней на примере использования лисаковского обжигмагнитного концентрата и промышленного концентрата Качканарского горно-обогатительного комбината.

На точность получаемых результатов будут влиять условия проведения опытов, анализу которых в работах [47, 48] не уделено должного внимания. Определение показателей комкуемости проводили на лабораторной установке, изображенной на рис. 1.33. Пропитку материала осуществляли в текстолитовых (внутренний диаметр – 14,5 мм, высота – 19 мм) и латунных (16 и 24 мм соответственно) колонках. Вначале использовали колонки без донышек. При этом минимальная плотность засыпки определялась способностью концентрата удерживаться в колонке без просыпания.

Зависимость влагоемкости от коэффициента скорости капиллярной пропитки определяли по 10 точкам (как рекомендовано в работе [48]), обрабатывая полученные значения с помощью метода наименьших квадратов. Результаты 10 определений НКВ, МКВ и К для лисаковского концентрата приведены в табл. 1.28. Из них видно, что в двух определениях полу-

чалось  $K > 1,0$ , что по мнению авторов методики [47, 48], невозможно.

Причина этого не только в том, что с ошибкой определена величина НКВ (завышена), но и в том, что значительно занижена величина МКВ.

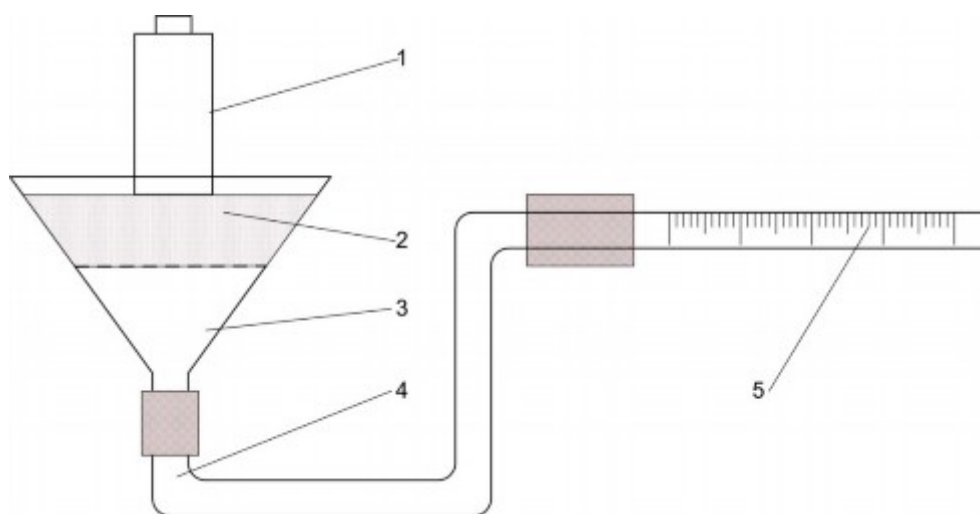


Рис. 1.33. Установка для пропитки дисперсных материалов жидкостью:

1 – колонка с исследуемым материалом; 2 – кварцевый песок; 3 – воронка;  
4 – соединительная трубка; 5 – мерная трубка

Таблица 1.28

**Результаты определения показателей комкуемости  
лисаковского обжигмагнитного концентрата**

Определение	Показатели			
	НКВ, %	МКВ, %	МГВ, %	К
1	9,81	23,13	0,14	0,73
2	10,91	22,90	0,14	0,90
3	9,77	22,04	0,14	0,78
4	9,25	22,28	0,14	0,70
5	9,72	21,85	0,14	0,79
6	11,39	21,51	0,14	1,11
7	11,35	21,87	0,14	1,07
8	9,24	22,39	0,14	0,69
9	8,85	21,50	0,14	0,68

10	8,62	22,17	0,14	0,63
Среднее для 10 определений	9,89	22,16	0,14	0,81
Среднеквадратичное отклонение	0,95	0,51	–	0,16
Максимальное отклонение для одного определения (при вероятности 0,95)	$\pm 2,26$	$\pm 1,21$	–	$\pm 0,38$
То же, % от среднего	$\pm 22,9$	$\pm 5,5$	–	$\pm 46,70$

Установлено, что при малых значениях плотности засыпки величина влагоемкости материала зависит от степени уплотнения очень существенно (достаточно слегка постучать по колонке, чтобы влажность понизилась на 10–15 %). В частности, если материал лишь начинает удерживаться в колонке (без доньшка) силой трения, то его влагоемкость обычно на 20–25 % ниже, чем при свободной засыпке. Таким образом, определение МКВ с помощью колонок без доньшка ведет к систематическому занижению величины МКВ (и к завышению показателя К соответственно).

Для выяснения величины систематической ошибки этого рода были проведены опыты по определению влагоемкости свободно засыпанного (без малейшего уплотнения) качканарского концентрата. Опыты выполнялись в трех вариантах: 1 – материал засыпался в текстолитовые колонки без доньшек; 2 – материал засыпался в латунные колонки с доньшками из латунной сетки; 3 – материал засыпался в латунные колонки с доньшками из марли. В первых двух случаях колонки устанавливались по девять штук в чашки Петри на слой влажного песка, покрытого тонким (0,5–1,0 мм) слоем воды. В третьем случае материал пропитывался с помощью устройства, изображенного на рис. 1.33.

Результаты определения влагоемкости концентрата в этих опытах приведены в табл. 1.30. Анализ данных этой таблицы показывает, что величина максимальной влагоемкости сильно зависит от способа определения даже в том случае, когда ее оценка производится при свободной засыпке материала. Однако во всех трех случаях влагоемкость свободно засыпанного концентрата оказалась существенно выше, чем влагоемкость концентрата, не просыпающегося из колонок без доньшек при минимально возможном уплотнении (последняя колонка табл. 1.30).

Из данных табл. 1.28 также видно, что точность определения показателя комкуемости К оказалась очень низкой (с вероятностью 0,95 отклоне-

ние одного определения К может достигать  $\pm 47$  %). Главной причиной

этого является низкая точность определения НКВ. Поэтому в последующих опытах определения НКВ вели по 18 точкам ( $W$ ,  $K_{\text{скп}}$ ), одновременно стремясь к максимальному рассеянию их относительно центра распределения, т. е.  $W$  и  $K_{\text{скп}}$  определяли по возможности для двух крайних состояний материала – максимально и минимально плотного (по девять точек). Остальные условия опытов были те же, что и в опытах с лисаковским концентратом, т. е. пропитку осуществляли в текстолитовых колонках без до-

нышек. Результаты девяти определений показателей комкуемости для качканарского концентрата приведены в табл. 1.29.

О применении колонок, закрытых снизу сеткой, авторы рассматриваемой методики упоминают в работе [48]. Однако в этой работе не рассматривается вопрос о влиянии донышка (сетки) на процесс пропитки материала и результаты определения НКВ. При попытке использовать в опытах латунные колонки с латунным сетчатым донышком было обнаружено, что в начале процесса пропитка материала происходит значительно медленнее, чем без донышка, с соответствующим увеличением общей продолжительности пропитки и нарушением закона постоянства коэффициента скорости пропитки. Причиной этого является создание воздушной прослойки (в ячейках сетки, неровностях рельефа песка под сеткой) из-за плохой смачиваемости латунной сетки. При использовании латунных колонок с марлевым донышком обнаружено, что пропитка идет значительно быстрее, т. к. марлевое донышко само поглощает жидкость. При этом закон постоянства скорости пропитки также нарушается.

Таблица 1.29

**Результаты определения показателей комкуемости  
и оптимальной влажности качканарского промышленного концентрата**

Определение	Показатели комкуемости (МКВ = 23,73 %; МГВ = 0,11 %)			
	Текстолитые колонки без донышка		Латунные колонки с марлевым донышком	
	НКВ, %	К	НКВ, %	К
1	8,36	0,54	9,35	0,64
2	7,01	0,41	9,75	0,69
3	9,32	0,64	10,54	0,79
4	8,71	0,57	8,73	0,57
5	7,92	0,49	9,88	0,71
6	7,70	0,47	10,25	0,75
7	8,68	0,57	10,21	0,75
8	8,94	0,60	9,83	0,70
9	7,92	0,49	9,41	0,65
Среднее по девяти определениям	8,28	0,53	9,77	0,69
Среднеквадратичное отклонение	0,67	0,07	0,52	0,06
Максимальное отклонение для одного определения (с вероятностью 0,95)	±1,65	±0,16	±1,27	±0,15
То же, % от среднего	±19,90	±30,70	±13,00	±22,00
Оптимальная влажность	10,24±1,12		10,84±0,64	



Таблица 1.30

**Определение максимальной влагоемкости качканарского промышленного концентрата**

Показатели	Способ засыпки концентрата			
	Свободная засыпка в текстолитовые колонки без донышек	Свободная засыпка в латунные колонки с донышками из латунной сетки	Свободная засыпка в латунные колонки с марлевыми донышками	Засыпка в текстолитовые колонки с минимальным уплотнением
Число определений	9	18	27	27
Средняя влагоемкость по всем определениям, %	26,52	24,96	23,73	21,02
Среднеквадратичное отклонение	0,50	0,30	0,28	0,74
Максимальное отклонение для одного определения (с вероятностью 0,95)	±1,18	±0,65	±0,59	±1,56
То же, % от среднего	±4,5	±2,6	±2,5	±7,4
Максимальное отклонение для среднего по девяти определениям (с вероятностью 0,95)	±0,39	±0,22	±0,20	±0,25



Специальные опыты показали, что марлевые донышки, которые изготавливали из кусочков марли диаметров 40–45 мм и подвязывали к колонке проволокой диаметром 0,3–0,4 мм, впитывают в зависимости от времени довольно стабильное количество жидкости. Усредненная кривая (получена по 18 определениям кривой), отображающая зависимость от времени объема жидкости, впитанной марлевым донышком, приведена на рис. 1.34. Используя этот график, провели серию опытов по пропитке качканарского концентрата в колонках с марлевым донышком, вычитая из общего объема пропитки ту часть, которая приходится на марлевое донышко. При этом оказалось, что закон постоянства коэффициента скорости пропитки хорошо выполняется, т. е. имеет место зависимость

$$(V - V_m)^2 = \tau K_{\text{скп}}, \quad (1.20)$$

где  $V$  – объем впитанной жидкости,  $\text{м}^3$ ;

$V_m$  – объем жидкости, впитанной (за то же время) марлевым донышком,  $\text{м}^3$ ;

$\tau$  – продолжительность пропитки, с.

Используя формулу (1.20) для расчета коэффициента скорости капиллярной пропитки, провели девять определений (по 18 точек в каждом) величины НКВ для качканарского концентрата с помощью латунных колонок, оснащенных марлевыми донышками. Результаты обработки этих определений приведены в табл. 1.29. Одновременно в этих опытах определена и величина МКВ (третья колонка табл. 1.29). Так как авторы работы [48] считают, что при МКВ значение коэффициента скорости пропитки должно быть максимальным, а для более высоких значений влагоемкости (табл. 1.29) определить величину  $K_{\text{скп}}$  не представляется возможным, то для качканарского концентрата принято  $\text{МКВ} = 23,73 \%$ , полученное при пропитке материала в латунных колонках с марлевым донышком, – именно в этом случае реально достигаются максимальные значения коэффициента скорости капиллярной пропитки.

Анализ данных табл. 1.29 показывает, что различие отдельных результатов определения НКВ и  $K$  при использовании колонок с марлевым донышком несколько меньше. Это можно объяснить тем, что в данном случае зависимость  $W = f(K_{\text{скп}})$  определяется в более широком диапазоне изменения плотности (вплоть до свободной засыпки). При определении

НКВ с помощью колонок без доньшка получены более низкие значения этого показателя, причем различие таково, что не может быть объяснено за счет случайной ошибки. Можно предположить, что в этом случае сказывается неравномерность уплотнения материала по высоте колонки в опытах с минимальным уплотнением. Специальные опыты показали, что влагоемкость материала после пропитки таких колонок (без доньшка) существенно возрастает снизу вверх вследствие некоторой неконтролируемой разницы в степени уплотнения верха и низа слоя в колонке. Такая неравномерность должна приводить к снижению эффективной величины коэффициента скорости пропитки и увеличению средней влагоемкости материала в опытах с минимальным уплотнением, что в итоге должно проявиться в снижении определяемой величины НКВ (см. табл. 1.29).

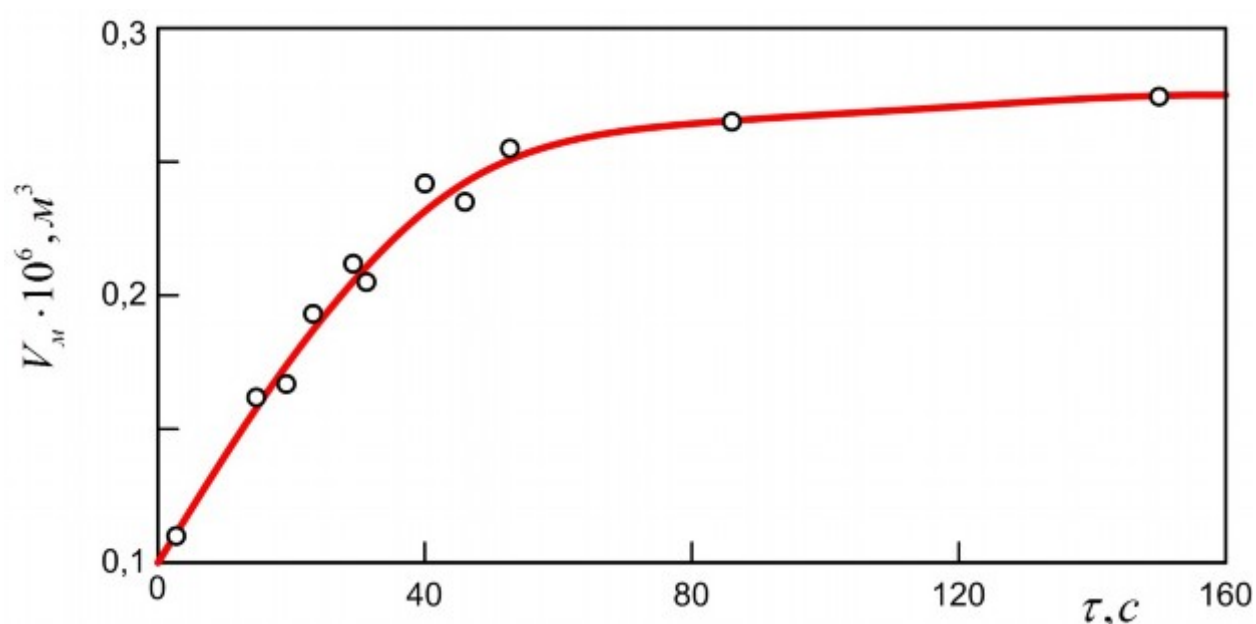


Рис. 1.34. Зависимость количества воды, впитанного марлевым доньшком колонки, от продолжительности пропитки дисперсного материала

Это хорошо видно на рис. 1.35, где кривая 2 получена путем приведения реальной зависимости, установленной в опытах на латунных колонках, к условиям опытов с текстолитовыми колонками. По физическому смыслу коэффициент скорости пропитки (при расчете на всю площадь впитывания) пропорционален квадрату площади впитывания. Поэтому при прочих равных условиях коэффициент скорости пропитки в латунных колонках выше в  $(d_{\text{л}}/d_{\text{т}})^4 = 1,48$  раза, где  $d_{\text{л}}$  и  $d_{\text{т}}$  — диаметры латунных и текстолитовых колонок. После деления всех значений  $K_{\text{скп}}$  на 1,48 получаем кривую 2 для второй серии опытов (с латунными колонками). Как видно из рис. 1.35, точки в зоне максимального уплотнения в обоих опытах локали-

зуются практически в одной области ( $K_{\text{скп}} = 13 - 22$ ,  $W = 13 - 17$ ), в то время как при минимальном уплотнении точки в опытах без донышек локализируются относительно выше (при одинаковых  $K_{\text{скп}}$ ).

Что касается оптимальной влажности окомкования, то в соответствии с формулой (1.18) она определяется в основном величиной НКВ, причем погрешности в определении НКВ и  $K$  до некоторой степени компенсируются. Поэтому погрешность определения величины оптимальной влажности примерно в два раза ниже, чем погрешность определения НКВ, и составляет лишь 6–12 % (для одного определения). При необходимости понизить погрешность определения НКВ,  $K$  и  $W_{\text{опт}}$  в  $N$  раз (против величин, указанных в табл. 1.29) следует повторить определение этих величин  $N^2$  раз и рассчитать среднее по всем определениям.

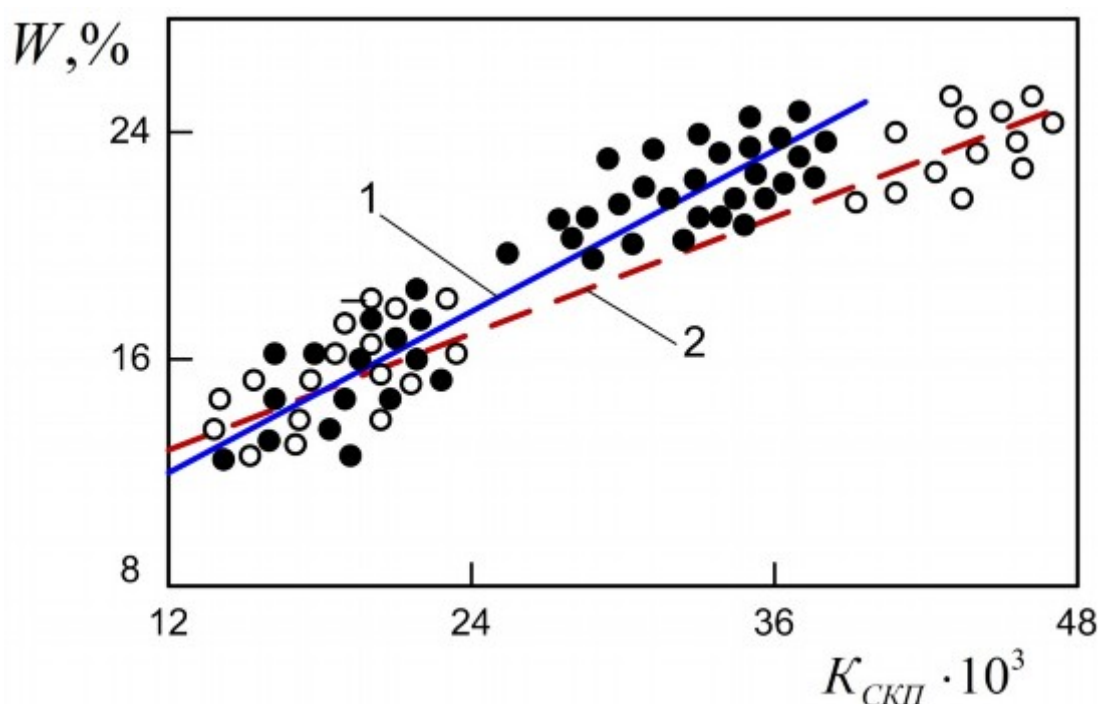


Рис. 1.35. Зависимость влагоемкости качканарского концентрата от коэффициента скорости капиллярной пропитки:  
1 и 2 – усредненные зависимости  $W = f(K_{\text{скп}})$ , полученные по данным опытов с колонками без донышек и имеющими марлевые донышки

Таким образом, в работе проведен анализ существующей методики определения основных показателей комкуемости дисперсных материалов, от которых зависит получение железорудных окатышей или агломерата с требуемыми физико-химическими свойствами, а также основные параметры последующей их термообработки.

Дана экспериментальная оценка точности определения показателей комкуемости и показано влияние способа и условий проведения опытов на величину получаемой систематической ошибки. На примере лисаковского обжигмагнитного концентрата и качканарского промышленного концентрата показана возможность дальнейшего совершенствования существующей методики.

Предложена установка для пропитки дисперсных материалов жидкостью, позволяющая задавать более широкие пределы определения влагоемкости материала в зависимости от коэффициента скорости капиллярной пропитки и снизить величину случайной ошибки в определении НКВ на 25–30 %.

Установлено оптимальное количество опытов по определению средней величины МКВ, позволяющее находить эту величину с точностью не ниже одного процента. При этом обеспечивается определение всех других показателей комкуемости с ошибкой не более 6–20 % (при надежности оценок 95 %).

### **1.11. Разработка метода расчета характеристик поровой структуры окатышей**

Вопрос формирования оптимальной исходной структуры и ее влияния на металлургические свойства окатышей после обжига является недостаточно изученным. Исходную структуру окатышей обычно связывают с их плотностью, которая зависит от пористости. При изучении влияния пористости исходных окатышей на конечные результаты их термической обработки используют общую пористость [50, 51], полагая, что она характеризует как свойства шихт, из которых изготовлены окатыши, так и работу окомковательного оборудования. В действительности основными факторами, непосредственно влияющими на протекание физико-химических процессов при термической обработке окатышей, является не общая пористость, а ее характеристики (диаметр пор, их разветвленность и распределение по радиусу и главное – поверхность пор). Формирование исходной структуры окатышей определяется свойствами и составом шихты, удельной поверхностью концентрата, количеством влаги и режимом окомкования. Анализ сломов исходных (влажных) окатышей показал [52], что в окомковании участвуют не только частицы концентрата, а и агрегаты частиц, образующих мелкие гранулы еще до окомкования.

Судить об изменении свойств концентратов и шихты можно и по удельной поверхности. Уровень грануляции шихты имеет тенденцию к повышению с ростом удельной поверхности концентрата. Если принять, что

концентрат состоит из сферических зерен диаметром  $d_3$ , то его удельная поверхность определяется по формуле

$$S_{\text{уд}} = 6 / (d_3 \rho), \quad (1.21)$$

где  $\rho$  – плотность зерен концентрата,  $\text{кг/м}^3$ .

Принимая условно за степень грануляции относительное изменение среднего диаметра частиц, можно сравнивать по этому показателю физические свойства различных шихт перед окомкованием.

Предварительная грануляция ухудшает свойства исходных окатышей, отрицательно влияя через исходную структуру и на металлургические свойства обожженного материала, нарушая однородность структуры окатышей и изотропность свойств.

Физическую модель исходного окатыша можно представить в виде структуры, состоящей из сферических гранул, которые в свою очередь образованы зернами концентрата. В таком окатыше следует различать мак-

ропоры, образованные гранулами и составляющие пористость  $\varepsilon_{\Gamma}$ , и микро-

поры непосредственно в гранулах, составляющие пористость  $\varepsilon_3$ . Общую

пористость окатыша можно определить из выражения

$$\varepsilon = 1 - V_{\text{м}} / V_{\text{ок}}, \quad (1.22)$$

где  $V_{\text{м}}$  – объем материала в окатыше;

$V_{\text{ок}} = 4\pi R^3 / 3$  – объем окатыша.

Количество гранул в окатыше составляет

$$N_{\Gamma} = (1 - \varepsilon_{\Gamma}) R^3 / \bar{r}_{\Gamma}^3, \quad (1.23)$$

а количество зерен концентрата в одной грануле равно

$$N_3 = (1 - \varepsilon_3) \bar{r}_{\Gamma}^3 / \bar{r}_3^3. \quad (1.24)$$

Здесь  $R$  – радиус окатыша,

$\bar{r}_{\Gamma}$  и  $\bar{r}_3$  – усредненные радиусы гранулы и частицы.

Тогда объем материала, равный объему всех зерен в гранулах окатыша, определится по уравнению

$$V_M = 4\pi\bar{r}_3^3 N_\Gamma N_3 / 3 = 4\pi R^3 (1 - \varepsilon_\Gamma)(1 - \varepsilon_3) / 3. \quad (1.25)$$

Отсюда можно вычислить общую пористость исходного окатыша

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_\Gamma)(1 - \varepsilon_3). \quad (1.26)$$

Удельную поверхность пор в окатыше можно выразить уравнением

$$S_\Pi = S_3 N_\Gamma N_3 / V_{ок}, \quad (1.27)$$

где  $S_3 = 4\pi\bar{r}_3^2$  – поверхность усредненного зерна. Поэтому имеем

$$S_\Pi = \frac{4\pi\bar{r}_3^2 (1 - \varepsilon_\Gamma) (R^3 / \bar{r}_\Gamma^3) (1 - \varepsilon_3) (\bar{r}_\Gamma^3 / \bar{r}_3^3)}{4\pi R^3 / 3} \quad (1.28)$$

или

$$S_\Pi = 3(1 - \varepsilon_\Gamma)(1 - \varepsilon_3) / \bar{r}_3 = 3(1 - \varepsilon) / \bar{r}_3. \quad (1.29)$$

Получение оптимальной исходной структуры окатышей требует такой шихтовки, при которой бы снижался процесс предварительной грануляции либо происходило образование гранул оптимальных размеров.

Достигнуть необходимой однородности и плотности в структуре промышленных окатышей можно за счет уменьшения предварительной грануляции при окомковании тонкоизмельченных концентратов или путем смешивания грубых и тонких частиц шихты.

Ниже показана возможность определения характеристик поровой структуры окатышей с использованием физических свойств исходной шихты [53]. Для этого была использована идеальная физическая модель, представляющая собой шар радиусом  $R$ , состоящий из сферических частиц со средним диаметром  $\bar{d}$ . При разработке методики было принято допущение, что частицы в исходном окатыше имеют точечный контакт между собой, а их поверхность открыта и адекватна поверхности пор. Тогда для исходного окатыша можно записать

$$S_p^o = S_{уд} M, \quad (1.30)$$

где  $S_p^o$  – полная реакционная поверхность,  $m^2$ ;

$M$  – масса окатыша, кг.

С учетом физической модели количество частиц в окатыше можно найти из выражения

$$N = \frac{4\pi R^3 (1 - \varepsilon) / 3}{4\pi \bar{r}^3 / 3} = \frac{R^3}{\bar{r}^3} (1 - \varepsilon). \quad (1.31)$$

Тогда можно записать

$$S_p^o = 4\pi R^2 \left[ \frac{R}{\bar{r}} (1 - \varepsilon) \right]. \quad (1.32)$$

Сравнивая выражения (1.30) и (1.32) и представив  $M = 4\pi R^3(1 - \epsilon)\rho/3$ ,

получим

$$\bar{d} = 6 / (S_{\text{уд}}\rho). \quad (1.33)$$

Средний диаметр частиц можно рассчитать и другим способом [44]:

$$\lg \bar{d} = \frac{\sum g_i \lg d_i}{\sum g_i}, \quad (1.34)$$

где количество частиц ( $g_i$ ) и их диаметр ( $d_i$ ) принимаются по гранулометрическому и седиментационному анализам. Следует отметить, что рассчитанные по выражениям (1.33) и (1.34) диаметры могут не совпадать по величине, т. к. в выражении (1.33) учитывается удельная поверхность шихты, а в выражении (1.34) – гранулометрический состав, хотя порядок величин совпадает. Диаметр, определенный по формуле (1.33), характеризует в основном содержание самых мелких фракций с развитой поверхностью и дает заниженные результаты. Однако, если выражение (1.33) позволяет определять только среднюю величину частиц концентрата, то с помощью соотношения (1.34) можно рассчитать диаметр любого узкого класса размеров частиц в данном концентрате. Эта возможность отнести средний диаметр к определенному классу частиц позволила в дальнейшем разделить объем пор в зависимости от их диаметра.

Объем всех пор окатыша можно численно приравнять к объему цилиндрического канала, названного эквивалентным, диаметр  $d_3$  и длину  $l_3$  которого можно рассчитать, используя для этого поверхность частиц. Действительно, суммарная поверхность всех пор составит

$$S_p^o = 2\pi \sum r_i l_i = 2\pi r_3 l_\Sigma. \quad (1.35)$$

Отсюда пористость окатыша можно определить из выражения

$$\epsilon = \frac{\pi r_3^2 l_\Sigma}{4\pi R^3/3}. \quad (1.36)$$

Решая совместно выражения (1.35) и (1.36) относительно  $r_3$  и  $l_3$  получим

$$r_3 = 8\pi\epsilon R^3 / (3S_p^o); \quad (1.37)$$

$$l_\Sigma = S_p^o / (2\pi r_3). \quad (1.38)$$

При сравнении уравнений (1.32) и (1.37) будем иметь

$$\frac{d_p}{d} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)}, \quad (1.39)$$

т. е. соотношение между средним диаметром частиц и эквивалентным диаметром канала пор определяется пористостью образца. Соотношение (1.39) справедливо для любой упаковки полидисперсных частиц – от единичного образца до слоя, с той лишь разницей, что для слоя оно определяется значением порозности.

Используя метод последовательного усреднения частиц по формуле (1.34) и соотношение (1.39), пересчитали размер частиц на размер пор. Дифференцировать диаметр пор на занимаемый ими объем можно исходя из распределения размера частиц на соответствующую массу по данным гранулометрии. Результаты этих расчетов представлены на рис. 1.36. Видно, что для шихт с удельной поверхностью  $200 \text{ м}^2/\text{кг}$  практически 100 % объема пор занимают поры размером более 25 мкм, для концентрата с меньшей удельной поверхностью диапазон пор, занимающих тот же объем, увеличивается до 125–150 мкм. Тем не менее, следует отметить, что во всех исследованных окатышах объем пор крупнее 100 мкм не превышает 15–17 % от общего их объема.

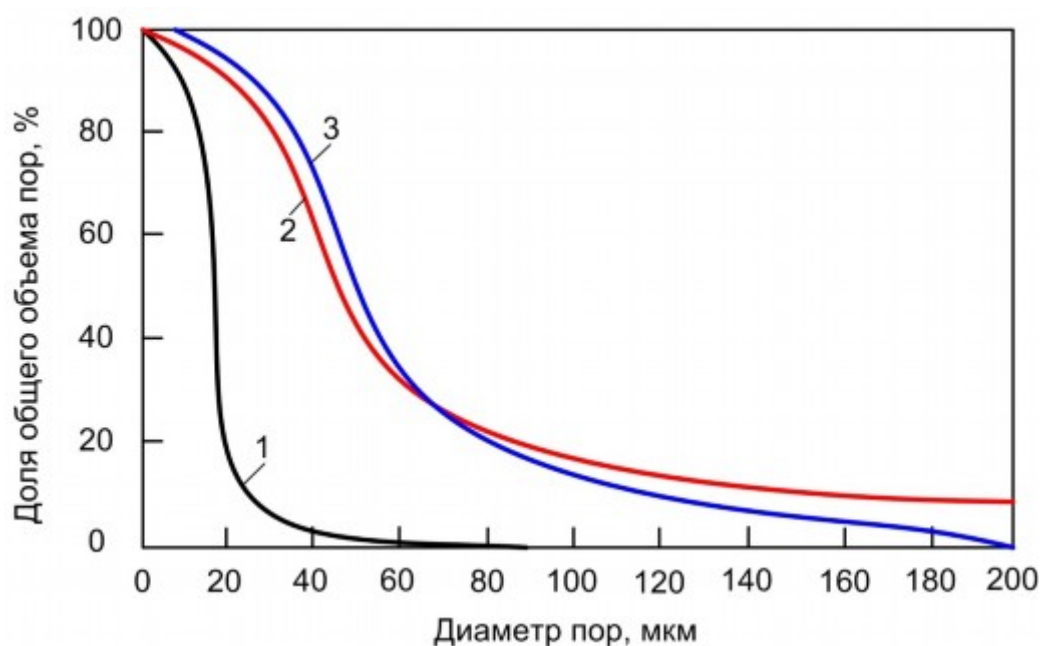


Рис. 1.36. Распределение объема пор по диаметрам окатышей:  
 1 и 2 – Лебединского ГОКа с  $S_{уд} = 200 \text{ м}^2/\text{кг}$  и  $S_{уд} = 130 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;  
 3 – Качканарского ГОКа с  $S_{уд} = 140 \text{ м}^2/\text{кг}$

Кроме дифференцирования размера пор на занимаемый объем, можно проанализировать закономерности распределения пор по радиусу ока-



тыша. Для этого были проведены дополнительные эксперименты, в которых последовательно снимали сферические слои с окатыша, взвешивали оставшуюся часть и определяли пористость  $i$ -го слоя:

$$\varepsilon_i = 1 - \frac{R_n^3(1 - \varepsilon_n) - R_k^3(1 - \varepsilon_k)}{R_n^3 - R_k^3}, \quad (1.40)$$

где  $R_n$ ,  $\varepsilon_n$  и  $R_k$ ,  $\varepsilon_k$  – начальные (до снятия сферы) и конечные (после снятия сферы) радиусы и пористость окатыша.

Сравнивая значения  $\varepsilon_i$ , распределенные по радиусу, получили распределение пористости по радиусу окатыша (рис. 1.37). Наиболее четко эта зависимость, связанная с уменьшением пористости к центру, проявляется для центральных участков окатыша радиусом 2,5–3,0 мм.

Оценку извилистости пор в окатыше, которая характеризует отклонение направления поры от прямолинейного (радиального), можно производить по коэффициенту  $K_n$  извилистости:

$$K_n = \frac{l \sum}{R} = \varepsilon \left[ \frac{9}{4} \left( \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + 1 \right]. \quad (1.41)$$

Таким образом, коэффициент извилистости обусловлен только структурными характеристиками окатыша. В исходных окатышах значения  $K_n$  изменяются в пределах 3–4.

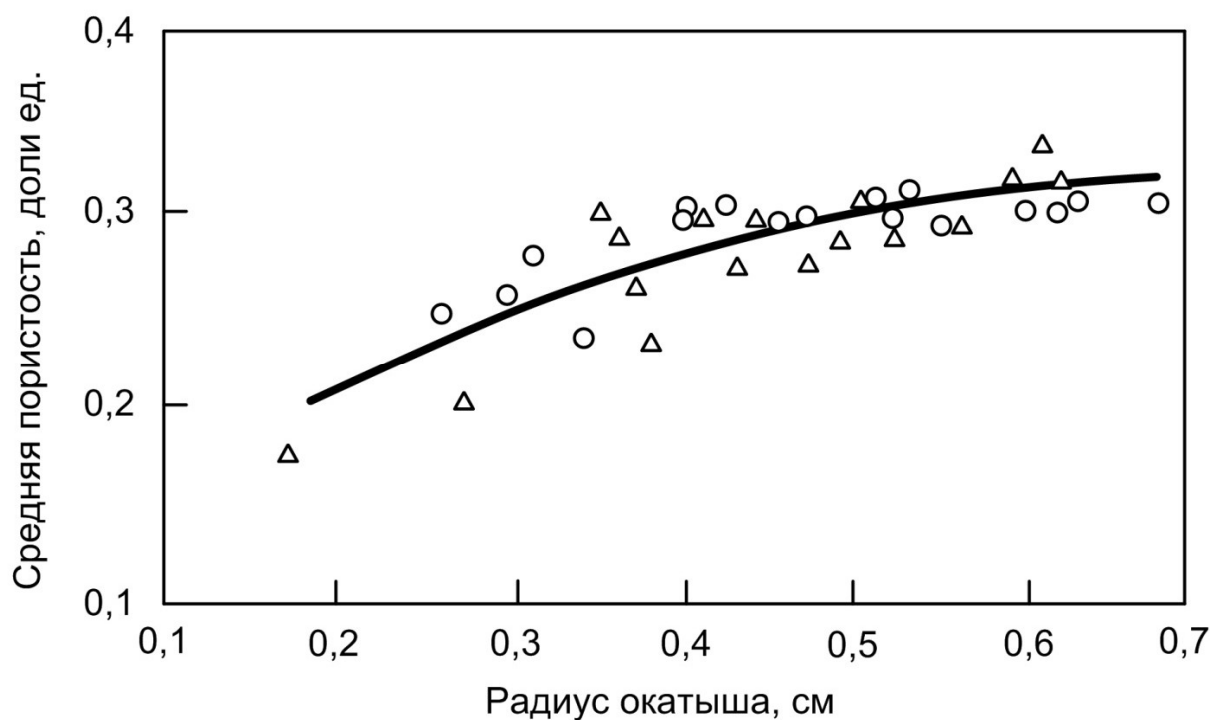


Рис. 1.37. Изменение средней пористости по радиусу исходных окатышей:

Δ и ○ – из лебединского и качканарского концентратов  
при  $S_{уд} = 130 \text{ м}^2/\text{кг}$  и  $S_{уд} = 140 \text{ м}^2/\text{кг}$  соответственно

Полученная зависимость изменения диаметра  $d_3$  от общей пористости и для различной удельной поверхности окатышей показала, что эквивалентный диаметр пор возрастает при уменьшении удельной поверхности шихты и более грубом ее гранулометрическом составе. С повышением удельной поверхности концентратов уменьшается размер пор в окатыше, что способствует увеличению контактных поверхностей между частицами. Установлено, что общая пористость определяется не только удельной поверхностью, но и диапазоном фракционного состава шихты, т. е. отношением максимального диаметра к минимальному. Увеличение этого отношения для концентрата ведет к уменьшению общей пористости. Последнее связано с тем, что при окомковании тонкоизмельченных концентратов с большим диапазоном крупности фракций мелкие зерна заполняют пустоты между крупными и вытесняют последние к периферии образуемого окатыша. Это обуславливает как пониженную пористость окатыша в целом, так и увеличение пористости по радиусу окатыша.

Проверка предложенной методики оценки поровой структуры окатышей с помощью экспериментально-расчетных исследований для конкретных условий промышленного производства окатышей показала, что параметры  $d_3$  и  $l_\Sigma$  связаны обратно пропорциональной зависимостью. Чем более тонким является концентрат, тем меньше  $d_3$  и больше  $l_\Sigma$ .

Структурные характеристики окатышей различных концентратов приведены в табл. 1.31.

С использованием методики расчета характеристик поровой структуры окатышей можно оценить преобладающий размер пор в исходном окатыше. Исходя из идеальной физической модели исходного окатыша, размер пор не превышает максимальных размеров частиц. Однако реальная структура исходных окатышей сложнее и характеризуется неравномерным распределением частиц и крупных пор по объему. Реальную физическую модель исходного окатыша можно представить в виде структуры, состоящей из сферических гранул, которые в свою очередь образованы зернами шихты произвольной формы.

Таблица 1.31

Структурные характеристики окатышей

Параметр	Значение параметра для концентрата	
	качканарского	лебединского
$D_{ок} \cdot 10^2, \text{ м}$	1,34	1,30/1,27
$G \cdot 10^3, \text{ кг}$	4,66	3,91/3,96
$\epsilon, \text{ доли ед.}$	0,31	0,32/0,35

$F \cdot 10^4, \text{ м}^2$	6519	5077/7920
$\bar{d} \cdot 10^5, \text{ м}$	3,10	4,76/2,58
$\bar{d} \cdot 10^6, \text{ м}$	8,12	9,27/5,26
$d_3 \cdot 10^6, \text{ м}$	9,24	14,86/9,34
$l_{\Sigma} \cdot 10^{-4}, \text{ м}$	2,25	1,09/2,70

*Примечание.* Удельная поверхность качканарского концентрата составила  $140 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а лебединского  $130 \text{ м}^2/\text{кг}$  (числитель) и  $200 \text{ м}^2/\text{кг}$  (знаменатель).

Крупные поры находятся на периферийных участках окатыша и располагаются по концентрическим сферам. В центре окатыша структура мелкопористая, в промежутках – смешанная.

Изменение структуры окатыша при обжиге зависит от степени окисления и режима термической обработки. Общая закономерность изменения пористости окатыша при обжиге показана на рис. 1.38, из которого видно, что до температуры  $1000^\circ\text{C}$  в структуре окатыша изменений пористости практически не происходит, но при этом уменьшается поверхность пор. В работе [54] показано, что развитие процесса окисления при температуре не ниже  $700^\circ\text{C}$  сопровождается диспергированием исходных зерен концентрата. При этом увеличивается количество микропор размером  $3,4 \text{ мкм}$  и сокращается количество пор среднего размера  $15\text{--}100 \text{ мкм}$ . Особенно этот процесс интенсифицируется при температурах  $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ . Увеличение времени обжига при этих температурах сопровождается заметным развитием микропористости, а при более высоких (порядка  $1300^\circ\text{C}$ ) – повышает долю крупных пор за счет мелких при снижении общей пористости.

Повышение скорости нагрева снижает общую пористость, уменьшает долю мелких пор и увеличивает долю крупных (свыше  $200 \text{ мкм}$ ).

С увеличением основности возрастает доля крупных пор при повышении общей пористости. Исследования показывают, что в обожженном окатыше основной объем пор составляют поры размером от  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $10^{-7} \text{ м}$ .

Определение характеристик поровой структуры окатышей позволяет оценить их роль в диффузионных процессах, происходящих при обжиге окатышей. Установлено, что определяющим фактором интенсивности процесса окисления является не общая пористость, а размер пор. Именно больший размер пор у окатышей с меньшей удельной поверхностью концентрата и обусловили их лучшую окисляемость. Указанный вывод относится к периоду окисления, когда этот процесс определяется в основном диффузией кислорода по порам окатыша, т. к. в дальнейшем при образовании пленки гематита на зернах превращение будет зависеть от размера зерен концентрата.

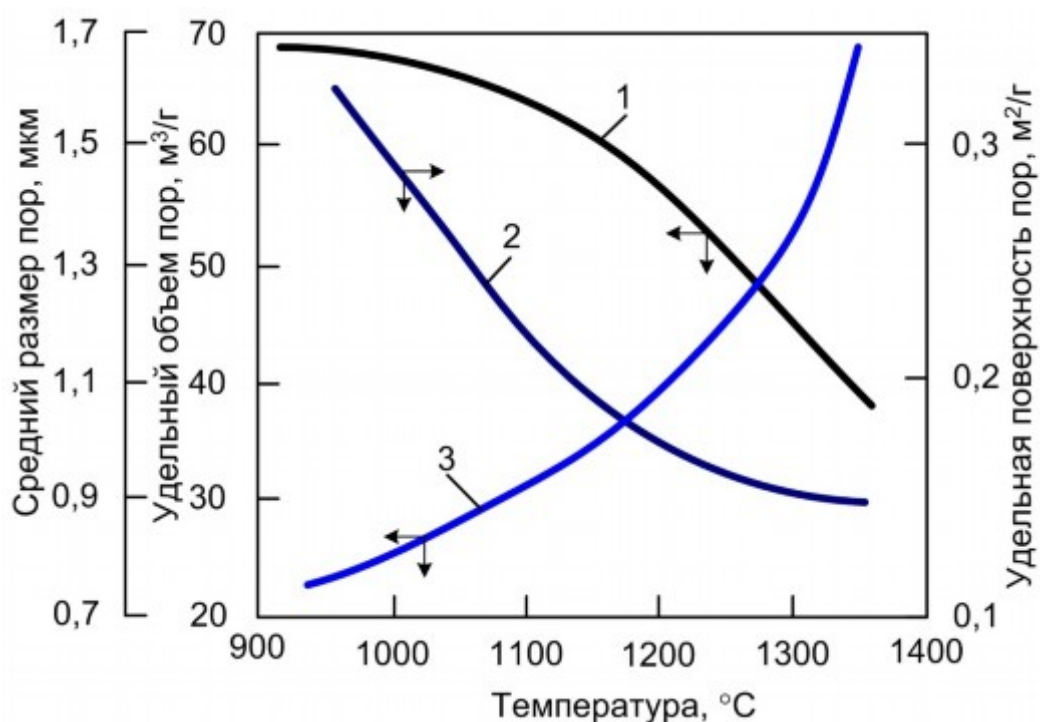


Рис. 1.38. Зависимость изменения пористости лебединских неофлюсованных окатышей от температуры:

1 и 2 – для удельных объема и поверхности пор; 3 – для среднего размера пор

Таким образом, рассмотрен механизм формирования оптимальной структуры окатышей и ее влияние на металлургические свойства обожженного продукта. Предложен метод расчета характеристик поровой структуры окатышей (диаметра пор, их разветвленности и распределения по радиусу, поверхности), позволяющий оценивать преобладающий размер пор в исходном окатыше и их роль в диффузионных процессах, происходящих при обжиге окатышей. Установлено, что характер пористости (размер, суммарная длина и распределение пор) наравне с термической обработкой является важным фактором, влияющим на физико-химические процессы, сопровождающие обжиг окатышей, и на их металлургические свойства.

### 1.12. Разработка технологии получения качканарских окатышей из концентрата, содержащего боратовую руду

В черной металлургии бор известен как эффективный легирующий элемент и модификатор, улучшающий свойства стали. В ряде работ показано использование бора для оптимизации свойств шлаков в аглодоменном производстве [55–57]. Благодаря снижению температуры плавления желе-

зо-кальций-силикатных систем целесообразно оценить влияние добавок природных боратов при производстве окучкованного сырья и в доменном переделе тугоплавких качканарских титаномагнетитов. Согласно экспериментальным данным, полученным на Нижнетагильском металлургическом комбинате (НТМК), ввод до 10 % борного ангидрида в доменные шлаки снижает температуру их плавления на 90 °С, а вязкость при 1500 °С – в три раза. Наряду со снижением работы адгезии (на 10–15 %) эти факторы должны способствовать уменьшению потерь металла со шлаком на 30–50 %. Производство 10 тыс. т борсодержащего агломерата на Лебяжинской фабрике и проплавление его в ванадиевом переделе в доменных печах (количество агломерата в шихте доменных печей не превышало 1,5–3,0 %) позволили получить следующие результаты: расход топлива при агломерации был снижен на 5 %, а в доменном производстве – на 1,5 %, потери металла со шлаками сокращены в четыре раза.

Представляет интерес разработка технологии введения бора в качканарское ванадийсодержащее сырье с целью исключения из доменной шихты агломерата, не содержащего ванадия. В настоящем разделе изучены технологические аспекты производства борсодержащих окатышей [58].

Для изготовления сырых окатышей использовали качканарский концентрат, известняк, бентонит и боратовую руду. Их химический и гранулометрический составы приведены в табл. 1.32. Боратовая руда содержит, %: 30 борсодержащих минералов (ашарит, углексит, гидроборацит, иньбит); 55 гипса; 5 ангидрида; 6 глинистых минералов; 4 кальцита.

Таблица 1.32

**Свойства исходных материалов  
для приготовления качканарских окатышей**

Свойства материалов	Качканарский концентрат	Известняк	Бентонит	Боратовая руда
Химический состав, %				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58,6	0,9	3,8	–
FeO	27,9	–	1,3	–
Fe	62,5	1,0	3,6	0,7
CaO	0,8	53,8	5,2	25,7
SiO <sub>2</sub>	2,5	1,0	59,1	6,4
S <sub>общ</sub>	0,01	–	–	10,9
SO <sub>3</sub>	–	–	–	27,5
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	–	14,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,6	0,32	15,3	–
TiO <sub>2</sub>	2,9	0,02	–	0,1
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,6	–	–	–

Содержание, % фракции, мм				
1,00	0,01	—	—	—
0,65	0,05	—	—	6,5
0,20	0,63	—	—	8,5
0,10	18,70	4,5	—	20,0
0,06	6,70	14,9	9,6	15,0
0,05	73,0	10,2	14,0	40,0
0,01	0,91	70,4	79,4	10,0

Сырые окатыши получали на лабораторном барабанном окомкователе диаметром 0,6 м. Испытывали офлюсованные до основности 1,2 окатыши с 1 % бентонита, с заменой 0,5 % бентонита на боратовую руду, с 0,5 % боратовой руды без бентонита и с добавкой 1, 2, 3 и 5 % боратовой руды. Из данных табл. 1.33 видно, что значения прочности окатышей с частичной заменой 0,5 % бентонита на боратовую руду и с 1 % бентонита одинаковы. Полный вывод бентонита с увеличением количества боратовой руды с 0,5 до 5,0 % ухудшает все показатели качества сырых окатышей.

Для объяснения полученных результатов по методикам, описанным в работе [59], были определены коллоидность, величины набухаемости и дзета-потенциала, характеризующие вяжущие свойства упрочняющих добавок. Установлено, что боратовая руда не образует коллоида, а ее дзета-потенциал и набухаемость равны нулю, для бентонита дзета-потенциал составляет 30 МВ, набухаемость – 4. Таким образом, опыты показали, что боратовая руда вяжущими свойствами не обладает и использовать ее возможно только в смеси с бентонитом. Выбор оптимального количества добавки боратовой руды будет определяться свойствами обожженных окатышей.

Таблица 1.33

**Свойства сырых окатышей из качканарского концентрата  
с добавкой бентонита и боратовой руды**

Добавки	Содержание, %					Влаж- ность, %	Прочность* на удар при $h = 300$ мм	Прочность ** на сжатие, Н/окатыш
	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	S <sub>общ</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Бентонит, %:								
1,0	24,8	3,8	4,6	—	—	6,7	5	14/10
0,5	24,8	3,8	4,8	0,06	0,05	6,6	5	13/10
Боратовая руда, %:								
0,5	—	—	—	—	—	7,0	4	5/8
1,0	25,5	3,8	4,6	0,13	0,15	7,2	4	7/9
2,0	26,9	2,9	3,1	0,19	0,25	7,2	4	7/8
3,0	26,9	2,9	3,2	0,27	0,32	7,2	4	7/9
5,0	26,5	3,0	3,3	0,47	0,59	7,2	5	7/8

\*Прочность на удар при  $h = 1$  м составляет 2, кроме случая использования 0,5 % боратовой руды.

\*\*Прочность на сжатие сухих (числитель) и сырых (знаменатель) окатышей.

С целью изучения влияния добавок боратовой руды на прочность, восстановимость и разбухание окатышей при восстановлении небольшую партию окатышей (10–15 шт.) обжигали в монослое на печи Таммана. Обожженные окатыши испытывали на прочность при раздавливании по ГОСТ 24765–81. Для определения использовали партию окатышей в количестве 20 шт. и находили среднее значение. Поскольку испытывали лабораторные окатыши, сравнительно однородные по размеру и составу, то

разброс не превышал  $\pm 10$  % от среднего значения. Для оценки восстано-

вимости и разбухания при восстановлении обожженных окатышей проводились опыты по изучению кинетики процесса и изменения размера при нагреве на дериватографе ОД–102, допускающем нагрев до  $1100$  °С.

Химический состав окатышей с бентонитом с добавкой 0,5 % бентонита и 0,5 % боратовой руды, с 2,3 и 5 % боратовой руды после обжига приведен в табл. 1.34. Из этих данных видно, что с ростом температуры увеличивается содержание FeO, который появляется в предварительно полностью окисленных качканарских окатышах вследствие диссоциации гематита при температурах выше  $1200$  °С. Сера при температурах обжига  $1270$  и  $1350$  °С удаляется практически полностью из окатышей всех изученных составов, степень десульфурации  $\eta_s$  составляет 97–99 %. Колебания остаточного содержания серы в окатышах (0,003–0,010 %) не выходят за пределы точности химического анализа. Снижение температуры обжига до  $1230$  °С приводит к некоторому повышению содержания серы при увеличении количества боратовой руды, но не более 0,02 %. При температуре обжига  $1180$  °С величина  $\eta_s$  окатышей снижается и остаточное содержание серы в них определяет среднеслоеое.

Полученные результаты объясняются тем, что при температуре ниже  $1230$  °С, когда основная шлаковая фаза, представленная главным образом ферритами кальция, еще не плавится [60], десульфурация происходит в результате образования ферритов по реакции  $\text{CaSO}_4 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{CaFe}_2\text{O}_4 + \text{SO}_2 + 0,5\text{O}_2$ , которая протекает с небольшой скоростью вследствие замедленной твердофазной диффузии при ферритообразовании, и за 3–6 мин обжига полного разложения сульфата кальция не происходит. При темпе-

ратуре выше 1230 °С реакция протекает с ассимиляцией продуктов диссоциации шлаковой оксидной жидкостью. Так как скорость диффузии в жидкости на порядок выше, чем в твердой фазе, десульфурация протекает более полно.

На рис. 1.39 приведена зависимость среднеслоевого содержания серы от количества боратовой руды. Из него видно, что замена 0,5 % бентонита на боратовую руду практически не изменяет среднего содержания серы, при дальнейшем увеличении количества боратовой руды в окатышах пропорционально возрастает остаточное содержание в них серы. Сопоставление содержания бора в сырых (табл. 1.33) и обожженных окатышах (табл. 1.34) показывает, что в ходе высокотемпературного обжига в интервале 1180–1350 °С бор не удаляется, колебания его содержания находятся в пределах точности химического анализа.

В табл. 1.34 приведена прочность обожженных окатышей, которая при 1270 и 1350 °С высокая (больше 3,5 кН/окатыш) и не зависит от содержания в них боратовой руды. Большую прочность окатышам с частичной диссоциацией гематита, обожженным при высоких температурах, придают однородность их структуры и высокая прочность, обусловленная жидкофазным спеканием. При 1180 и 1230 °С прочность окатышей с бентонитом снижается в 2,5 раза. Такое резкое изменение ее можно объяснить недостаточным количеством расплава, т. к. основным его источником являются ферриты кальция, температуры плавления которых в присутствии тугоплавких металлов (Mg и Ti) составляют 1230–1250 °С [60].



Таблица 1.34

## Металлургические свойства обожженных окатышей из качканарского концентрата с добавкой боратовой руды

Номер варианта	Добавка,*%	Температура обжига, °С	Прочность, кН/окатыш	Содержание, %						η <sub>s</sub> , %	В <sub>1000</sub> , %	Δl/l <sub>0</sub> , %
				Fe <sub>общ</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	S <sub>общ</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
1	1б	1350	3,7	–	4,5	3,3	3,9	0,010	–	–	36,8	3,9
2	0,5б и 0,5бр	1350	3,7	59,8	3,7	2,7	3,9	0,010	0,03	90	52,1	4,3
3	2бр	1350	5,0	–	5,4	2,8	3,9	0,005	0,27	97	41,4	9,4
4	1б	1270	4,5	59,4	0,9	3,2	3,9	0,003	–	–	–	–
5	0,5б и 0,5бр	1270	3,7	59,5	1,4	2,7	3,4	0,004	0,03	96	–	–
6	2 бр	1270	3,5	60,0	1,0	2,7	3,4	0,005	0,20	97	–	–
7	1б	1230	2500	–	1,8	3,5	3,8	0,005	–	–	70,2	7,4
8	0,5б и 0,5 бр	1230	2500	59,9	1,1	2,9	3,4	0,001	0,03	90	58,5	6,4
9	2 бр	1230	3100	–	1,3	3,2	3,5	0,014	0,30	93	65,6	9,8
10	1 бр	1180	1400	–	0,9	3,6	3,7	0,021	–	–	64,5	5,2
11	0,5 б и 0,5 бр	1180	2000	59,3	1,2	2,9	3,7	0,058	0,03	42	58,8	5,5
12	2 бр	1180	2000	–	1,3	3,1	3,4	0,079	0,32	70	55,8	10,6
13	1 б	Средняя по слою	2900	–	2,0	3,4	3,8	0,009	–	–	57,2	5,5
14	0,5б и 0,5 бр	То же	3000	59,6	1,9	2,8	3,6	0,019	0,03	81	56,5	5,4
15	2бр	«	3400	–	3,9	2,9	3,6	0,026	0,27	86	54,3	9,9

\*б – бентонит, бр – боратовая руда

Замена бентонита на боратовую руду приводит к значительному упрочнению (с 2,5 до 3,6 кН/окатыш при температуре обжига 1230 °С и с 1,4 до 3,0 кН/окатыш при 1180 °С), что отразилось на среднеслоевом значении прочности. Из данных, приведенных на рис. 1.39, *а*, видно, что средняя прочность не изменяется при замене 0,5% бентонита на боратовую руду и увеличивается при дальнейшем росте ее содержания в окатышах.

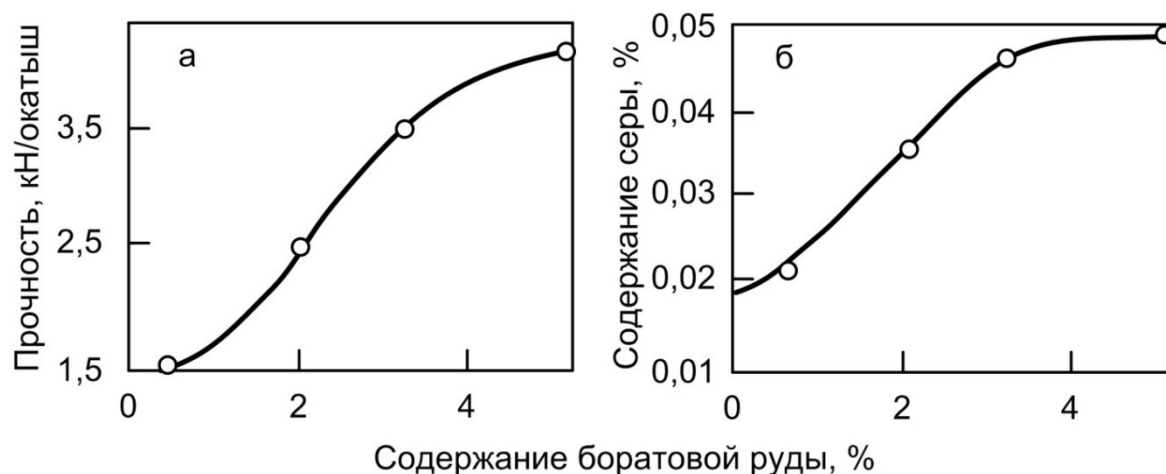


Рис. 1.39. Изменение прочности на сжатие (*а*) и среднемассового содержания серы (*б*) качканарских окатышей в зависимости от содержания в них боратовой руды

Поведение окатышей в ходе восстановительно-тепловой обработки представлено на рис. 1.40, где приведены кривые изменения степени и скорости восстановления с температурой неизотермического нагрева для окатышей с 1 % бентонита, заменой 0,5 % бентонита на боратовую руду и с 2 % боратовой руды. Для всех изученных составов ход кривых восстановления идентичен. Сначала скорость восстановления резко увеличивается в связи с переходом гематита в магнетит, затем несколько снижается, и в интервале температур 700–800 °С наблюдается второй максимум на кривых изменения скорости восстановления, обусловленный восстановлением магнетита до вюстита. При 850–950 °С отмечается участок подъема скорости восстановления, указывающий на появление металлического железа. Замена бентонита на боратовую руду (рис. 1.40, *а–в*) приводит к смещению температурных интервалов восстановления образцов в область более высоких температур.

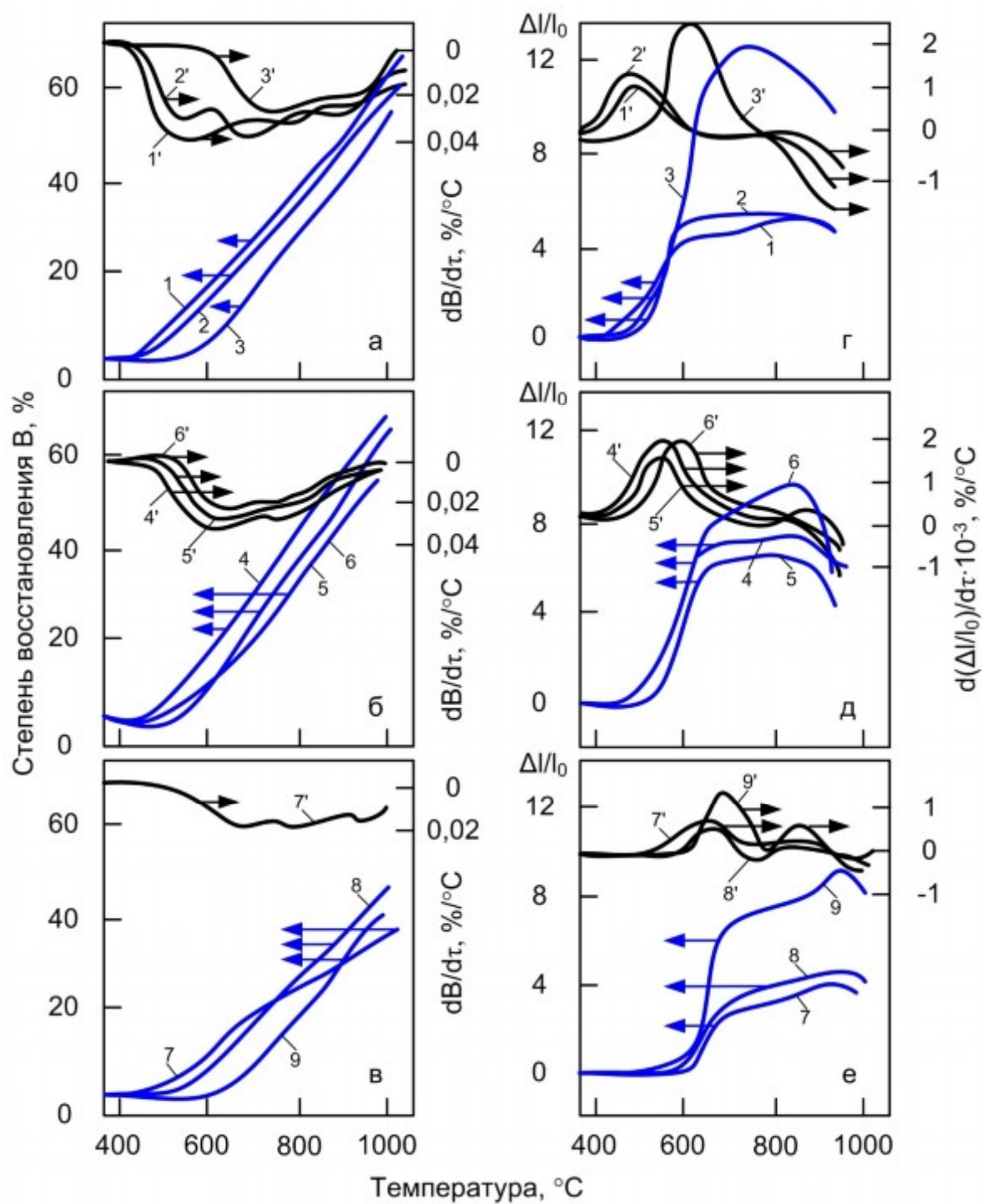


Рис. 1.40. Дериватографические (а–в) и дилатометрические (г–е) кривые восстановления качканарских окатышей:  
а, г – температура обжига 1180 °С; б, д – 1230 °С; в, е – 1350 °С;

1, 4, 7, 1', 4', 7' – с добавкой 1 % бентонита;

2, 5, 8, 2', 5', 8' – 0,5 % бентонита + 0,5 % боратовой руды;

3, 6, 9, 3' 6', 9' – 2 % боратовой руды

Сопоставление кинетических кривых с дилатометрическими (рис. 1.40, *г–е*) показывает, что участкам подъема скорости восстановления гематита до магнетита и магнетита до вюститита соответствуют участки разбухания, причины которого изложены ранее. Замена 0,5 % бентонита на боратовую руду практически не изменяет разбухания образцов, при повышении содержания боратовой руды до 2 % оно резко усиливается, особенно в области твердофазного восстановления. После участков разбухания наблюдается спекание окатышей, причем замена бентонита на боратовую руду усиливает усадку и снижает температуру ее начала вследствие понижения температуры образования расплава в присутствии  $B_2O_3$  [57].

В табл. 1.34 приведены среднеслоевые значения степени восстановления, достигаемые при нагреве до 1000 °С ( $V_{1000}$ ), и максимального разбу-

хания ( $\Delta l/l_0$ ) окатышей всех изученных составов. Из нее видно, что добавки

боратовой руды практически не влияют на восстановимость, а разбухание остается постоянным при введении 0,5 % боратовой руды и резко возрастает при увеличении ее количества до 2 %. Снижение восстановимости с одновременным существенным увеличением разбухания не позволяет использовать окатыши, содержащие больше 0,5 % боратовой руды, в доменных печах.

Таким образом, испытания, проведенные в лабораторной трубчатой печи, позволили установить, что оптимальное количество добавки боратовой руды 0,5 % дает возможность получать более прочные окатыши при температурах нижних слоев не менее 1180 °С и сохранять среднеслоевые значения восстановимости и разбухания на уровне обычных окатышей КГОКа с частичной диссоциацией гематита. Введение 2 % боратовой руды приводит к значительному упрочнению окатышей по сравнению с бентонитовыми, но в два раза увеличивает максимальное разбухание при практически неизменной восстановимости. Степени десульфурации окатышей с добавками боратовой руды достигают высоких значений.

Сделанные выводы с известной долей приближения основываются на опытах, моделирующих слоевой обжиг в монослое окатышей. В частности, не учитывалась возможность поглощения серы окатышами постели при слоевом проведении процесса. Для проверки полученных результатов и уточнения оптимального количества добавки боратовой руды были проведены эксперименты по термообработке окатышей в слое на установке аглочаша.

После опытов слой окатышей разбирали на три равные части: верх, середина, низ. Обоженные окатыши и постель испытывали на прочность при сжатии (по двадцати окатышам), усредненную пробу оценивали на прочность при восстановлении по ГОСТ 19575–74 и на механическую прочность во вращающемся барабане. Для определения механической прочности использовали мини-барабан диаметром 0,4 м с двумя полками шириной 0,025 м, который вращался со скоростью 25 об/мин в течение 40 мин. Масса пробы составляла 1 кг.

Представленные ранее результаты показывают, что увеличение добавки боратовой руды до 2 % приводит к катастрофическому разбуханию окатышей, а сырые окатыши без бентонита практически получать невозможно. Поэтому в опытах использовали окатыши с добавкой 1 % бентонита, с заменой 0,5 % бентонита на боратовую руду и с добавкой 1 % боратовой руды.

Металлургические свойства и химический состав обоженных окатышей приведены в табл. 1.35. Из нее видно, что основные закономерности, выявленные в опытах в трубчатой печи, подтверждаются. Среднеслойная прочность в холодном состоянии после обжига незначительно возрастает при введении 0,5 % боратовой руды и значительно (с 2,4 до 2,8 кН/окатыш) – при добавке 1 % боратовой руды. Несмотря на высокую прочность окатыши с 1 % боратовой руды сильно истираются, и содержа-

ние класса  $<0,5$  мм в них в 1,5 раза выше, чем в окатышах с бентонитом,

что обусловлено снижением температуры их обжига. Окатыши с бентонитом имеют прочность после восстановления, определенную по

ГОСТ 19575 (класс  $>10$  мм) – 2,5 %, разрушаемость (5–0,5 мм) – 26 %, ис-

тираемость – 67 %. Высокое значение истираемости связано с недостаточной степенью диссоциации гематита, которая при 1350 °С не превышает

10 %, а при остальных температурах приближается к нулю. Замена 0,5 % бентонита на боратовую руду не приводит к изменению прочности при восстановлении. При введении 1 % боратовой руды выхода крупных клас-

сов ( $>10$  мм) практически нет, а разрушаемость и истираемость повыша-

ются (табл. 1.35).

Степень десульфурации окатышей, как и в опытах на печи Таммана, достигает высоких значений. Из табл. 1.35 следует, что сера в окатышах постели не накапливается. Это связано с тем, что температура  $1180^{\circ}\text{C}$ , которая поддерживалась в опытах на границе слой–постель, выше температуры начала разложения сульфата кальция в присутствии оксидов железа [61]. Снижение температуры до  $1100\text{--}1150^{\circ}\text{C}$  приведет к накоплению серы с учетом постели. Среднеслоевое содержание серы с учетом постели в окатышах с добавками боратовой руды составляет 0,01 %. Бор в ходе термообработки в интервале  $1180\text{--}1380^{\circ}\text{C}$  не удаляется, в окатышах постели он не обнаружен.

Эксперименты показали, что замена 0,5 % бентонита на боратовую руду несколько повышает прочность обожженных окатышей и не изменяет прочности после восстановления по сравнению с бентонитом. Добавка 1 % боратовой руды также улучшает прочность обожженных окатышей, но приводит к увеличению разрушаемости и истираемости.

Таблица 1.35

**Металлургические свойства офлюсованных обожженных  
на установке аглочаша окатышей из качканарского концентрата**

Часть слоя	Прочность на сжатие, кН/окатыш	Содержание, %						ηs, %	Истираемость*, %	Восстановимость, %	Прочность при восстановлении по ГОСТ 19575-74, %, фракции, мм		
		Fe <sub>общ</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	S <sub>общ</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				>10	5–0,5	<0,5
Добавка 1 % бентонита													
Верх	2,90	–	3,0	4,7	3,9	–	–	–	–	–	–	–	–
Середина	2,26	58,0	1,7	4,6	3,8	–	–	–	10	38,4	2,5	26,0	67,0
Низ	1,87	–	0,5	4,3	3,5	–	–	–	–	–	–	–	–
Среднее	2,34	–	1,8	4,5	3,7	–	–	–	–	–	–	–	–
Добавка 0,5 % бентонита и 0,5 % боратовой руды													
Верх	2,90	–	3,0	4,0	3,7	0,01	0,07	82	–	–	–	–	–
Середина	2,34	58,3	1,4	4,7	3,8	0,01	0,08	82	–	–	–	–	–
Низ	2,17	–	1,0	4,2	3,4	0,02	0,07	71	9	39,7	2,5	25,8	68,0
Постель	–	–	–	5,0	4,0	0,01	0,01	–	–	–	–	–	–
Среднее	2,47	–	1,8	4,5	3,7	0,01	0,07	78	–	–	–	–	–
Добавка 1 % боратовой руды													
Верх	3,71	–	1,0	3,8	3,3	0,01	0,16	92	–	–	–	–	–
Середина	2,54	58,4	0,6	3,9	3,2	0,02	0,17	86	–	–	–	–	–
Низ	2,20	–	0,6	4,0	3,2	0,02	0,14	83	15	41,4	0,2	28,3	71,3
Постель	–	–	–	4,7	3,8	0,01	–	–	–	–	–	–	–
Среднее	2,82	–	0,7	4,1	3,4	0,01	0,16	–	–	–	–	–	–

\*Содержание фракции <0,5 мм



Для выяснения механизма влияния боратовой руды на прочностные характеристики обожженных окатышей и поведение их при восстановлении проводились минералогические и спектроскопические исследования. Установлено, что добавка боратовой руды повышает прочность окатышей, обожженных при 1180 и 1230 °С. Это явление можно объяснить тем, что шлаковая связка в окатышах с бентонитом, которая по данным минералогического анализа представлена в основном ферритом кальция, при температуре ниже 1230 °С образует недостаточное количество расплава и распространена неравномерно по объему окатыша. Связка борсодержащих окатышей, по данным минералогического и ИК-спектроскопического анализов, представлена силикатами с примесью бора. Согласно данным [57], железо-кальций-силикатные шлаки, содержащие бор, плавятся при 1180–1250 °С. Более жидкая шлаковая связка проникает равномерно между зернами гематита, уплотняя структуру окатышей по сравнению с окатышами с бентонитом, и образует при охлаждении устойчивые перегородки из кристаллов в стекле.

Особенности структуры и состава шлаковых связок при различных содержаниях бора отражаются не только на прочности в исходном состоянии, но и на поведении окатышей при восстановлении. Установлено, что железо-кальций-силикатные стекла, составляющие основу шлаковых связок борсодержащих окатышей, при вторичном нагреве в восстановительной среде подвержены низкотемпературной раскристаллизации, при которой появляются новообразования. Указанный процесс сопровождается образованием микротрещин на границах растущих фаз. Восстановительный газ по этим трещинам проникает к зернам железоксидных минералов, восстанавливает их, начиная с 600–700 °С. Наблюдаемые на шлифах частично восстановленных окатышей разрывы в связке, указывают на процесс интенсивного разбухания восстанавливающихся рудных зерен. Этот процесс, безусловно, отрицательно сказывается на прочности окатышей, содержащих более 2 % бора, которые практически разрушаются в восстановительных агрегатах.

Стеклообразная шлаковая связка в окатышах без бора, обожженных при температурах частичной диссоциации гематита, не претерпевает существенных изменений агрегатного состояния при нагреве в восстановительной среде до 700–800 °С. В результате рудные зерна, включенные в шлаковую матрицу, восстанавливаются в интервале температур, когда оксидные включения переходят в пластическое состояние. Возникающие при разбухании гематита напряжения ослабляются, и окатыши в меньшей мере теряют свою прочность.

Предварительный анализ физико-химических процессов, протекающих при обжиге и восстановлении окатышей, показал, что холодная прочность при добавке боратовой руды возрастает в результате снижения температур плавления и вязкости боратовых шлаков, а горячая прочность падает из-за большей склонности железо-кальций-силикатных стекол с примесями бора к раскристаллизации при повторном нагреве в восстановительной среде.

Таким образом, результаты проведенных опытов показали, что боратовая руда не обладает вяжущими свойствами и вводить ее в сырые окатыши рекомендуется только вместе с бентонитом. Среднеслоевая прочность обожженных окатышей несколько возрастает при замене 0,5 % бентонита на боратовую руду и увеличивается в 1,2–1,5 раза при росте концентрации боратовой руды с 0,5 до 5 %. Замена 0,5 % бентонита на боратовую руду не изменяет величин разбухания и разрушения окатышей, а увеличение количества боратовой руды до 2 % приводит к резкому возрастанию линейного разбухания с 5,4 до 10 %. Восстановимость при этом практически не изменяется.

С целью оптимизации шлакового режима в доменных печах и сокращения потерь металла со шлаком рекомендуется: провести промышленные испытания по наработке опытной партии качканарских окатышей с добавкой 0,5 % боратовой руды в смеси с 0,5 % бентонита и проплавить ее в доменных печах НТМК.

## **2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД И КОНЦЕНТРАТОВ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ ПЕРЕДЕЛАМ**

### **2.1. Применение сверхвысокочастотных полей для сушки железорудных концентратов**

В настоящее время в процессы производства черных металлов все больше вовлекаются труднообогатимые и бедные железные руды. Причем требования к качеству получаемых концентратов, особенно к содержанию в них железа, также непрерывно возрастают. Это требует разработки новых экономически эффективных и экологически чистых технологий обогащения. Решить указанные проблемы можно, только применяя новые нетрадиционные виды энергии, например, энергию сверхвысоких частот (СВЧ).

Наиболее распространенный способ использования СВЧ-энергии – диэлектрический нагрев, вызванный диэлектрическими потерями при взаимодействии электрической компоненты СВЧ-поля с веществом. Этот вид нагрева достаточно широко используется для обработки пищевых продуктов, сушки влажных материалов, сварки пластмасс и др. Однако в металлургических процессах СВЧ-нагрев практически не применяется. Использование энергии СВЧ-полей очень перспективно, в ряде случаев обладает несомненными преимуществами. Источники СВЧ-нагрева не загрязняют концентрат составляющими продуктов сгорания при нагреве, отличаются гибкостью в применении, практически безынерционны в управлении, имеют очень высокие скорости нагрева (до 500 °С/мин и выше). Сочетание СВЧ-полей с другими методами нагрева дает возможность конструировать технологическое оборудование для выполнения разнообразных функций. Способность СВЧ-полей преобразовываться в теплоту в одних материалах лучше, чем в других, позволяет конструировать рабочие контейнеры, не реагирующие с нагреваемыми материалами, т. е. не загрязняющие обрабатываемое изделие [62]. Все отмеченные достоинства энергии СВЧ-полей и достаточно широкий набор СВЧ-генераторов разной мощности позволяют применять данный метод в разных отраслях техники.

Наиболее универсальные характеристики для описания воздействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона – диэлектрическая  $\epsilon$  и магнитная  $\mu$  проницаемости материалов. В общем случае эти величины комплексные: если поглощение электромагнитного излучения отсутствует, мнимые части  $\epsilon$  и  $\mu$  малы по сравнению с действительными и ими можно пренебречь. Если мнимые части сравнимы по величине с действительными (мнимыми

частями  $\epsilon$  и  $\mu$  пренебречь нельзя), значит, материал обладает свойством поглощать электромагнитное излучение. Поглощение не просто рассеяние энергии при взаимодействии материала с падающей на него электромагнитной волной. В данном случае поглощение связано с переходом энергии электромагнитного поля в другие виды, например, выделение теплоты [63]. Поглощающая способность материала характеризуется величиной тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$ , где  $\epsilon''$  и  $\epsilon'$  – мнимая и действительная части диэлектрической проницаемости.

Коэффициент  $\alpha$  затухания электромагнитных волн при облучении материала СВЧ-полем имеет вид

$$\alpha = \left( \frac{2\pi\sqrt{\epsilon}}{\lambda} \right) \sqrt{0,5 \left( \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta} - 1 \right)},$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Величина мощности  $P$  поля, поглощаемой материалом, определяется по формуле

$$P = P_o \left( 1 - \frac{1}{e^2} \right) = 0,864 P_o,$$

где  $P_o$  – мощность падающей волны;

$e$  – величина, обратная коэффициенту затухания.

Исследованию процессов сушки руд, концентратов и окатышей в СВЧ-полях уделено явно недостаточное внимание. Авторы работ, выполненных в институте «Механобрчермет» (г. Кривой Рог, 1983 г.) и Институте горного и тяжелого машиностроения (г. Днепропетровск, 1981 г.), рассмотрели принципиальную возможность нагрева железной руды, магнетитового и гематитового концентратов и сырых окатышей из этих концентратов при частоте излучения СВЧ-поля 2375 МГц. Нагревали до 500–700 °С (неясно, были ли это предельно допустимые или заданные температуры). Скорость нагрева руды составляла 250 °С/мин, концентрата и окатышей – 500 °С/мин. Более низкая скорость нагрева руды по сравнению со скоростью нагрева концентратов связана с меньшим количеством фаз, поглощающих энергию СВЧ-поля. Совпадение скоростей нагрева магнетитовых и гематитовых концентратов и окатышей не вполне ясно, поскольку магнетит поглощает энергию СВЧ-поля значительно лучше гематита.

Из-за менее жестких требований к физическим свойствам материала и более легкого управления процессом СВЧ-токи более пригодны для процесса сушки, чем токи высокой частоты. В ходе исследований фиксировали изменение влажности материала во времени. Скорости сушки марганцевого и железного концентратов, гематитовых и магнетитовых окатышей составляли соответственно 7,0; 2,0–4,0; 1,2 и 3,0 %/мин и не зависели от

начальной влажности. В центре пробы температура существенно выше (500–700 °С), чем на периферии.

Сушка материалов по существующим технологиям в настоящее время – малопроизводительный процесс, поэтому использование нетрадиционных методов может оказаться весьма перспективным. В процессе облучения концентратов СВЧ-полем по всему объему материала происходит поглощение электромагнитных волн, при этом происходит нагрев концентрата и испарение воды. Объемный характер нагрева обеспечивает благоприятные условия для тепло- и массообмена в слое. Перенос теплоты не зависит от газопроницаемости слоя, поэтому сушке в СВЧ-полях можно подвергать и тонкие концентраты, уложенные на ленту плотным слоем.

В настоящем разделе на примере сушки оленегорского суперконцентрата тонкого помола проведена оценка возможностей использования СВЧ-полей для сушки железорудных концентратов [64]. Концентрат содержал, %: 72 Fe<sub>общ</sub>; 0,27 SiO<sub>2</sub>; 0,03 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,02 CaO; 0,007 MgO; 0,01 S; 0,081 MnO; 0,031 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Железо в концентрате содержится только в виде магнетита.

Гранулометрический состав концентрата приведен ниже:

Размер частиц, мм	<0,010	>0,010	>0,014	>0,023	0,0	>0,044
Содержание, %	0,9	7,5	24,1	52,9	12,1	2,5

В ходе сушки не допускается изменений химического и гранулометрического составов концентрата и его магнитных свойств, т. к. он используется для приготовления ферритных порошков.

Для исследований использовали СВЧ-генератор мощностью 650 Вт с частотой 2450 МГц. Обработку материала в СВЧ-полях проводили на установке, схема которой показана на рис. 2.1. Ячейка для нагрева материалов представляет собой кварцевый реактор, помещенный в теплоизолирующий контейнер из огнеупорного материала, не поглощающего излучение СВЧ-поля. Опыты проводили в атмосфере воздуха, выделяющийся пар удаляли через кварцевую трубку. Температуру материала измеряли хромель-алюмелевой термопарой и потенциометром КСП–4. Сушке подвергали пробы влажностью 10,15 и 18 %. В ходе нагрева непрерывно фиксировали температуру  $t$  образца. Температура  $t_c$  составляла 140–200 °С, длительность  $\tau_c$  изотермической выдержки – 5 мин.

Связанное с окислением магнетита увеличение массы начинается при 210 °С, поэтому предельная температура сушки на воздухе – 200 °С.

В среде инертного газа температура сушки может быть повышена, а ее интенсивность увеличена.

Условия нагрева, показатели сушки (степень удаления влаги  $\eta$ ) и химический состав оленегорского концентрата после обработки в СВЧ-поле представлены ниже:

Опыт №	Влажность $w^*$ , %	$t_c$ , °C	$\tau_c$ , мин	$\eta$ , %	Содержание, %	
					Fe <sub>общ</sub>	FeO
1	10/0,1	202	5,5	99,1	72,0	30,4
2	10/0,6	140	5,7	94,4	71,4	29,4
3	15/0,0	142	5,5	100,0	71,7	29,0
4	15/0,6	185	4,2	96,2	71,1	27,3
5	18/0,5	162	0	97,5	71,3	28,0
6	0,0/0,0	–	–	–	71,5	30,5

\* Числитель – исходная влажность, знаменатель – конечная.

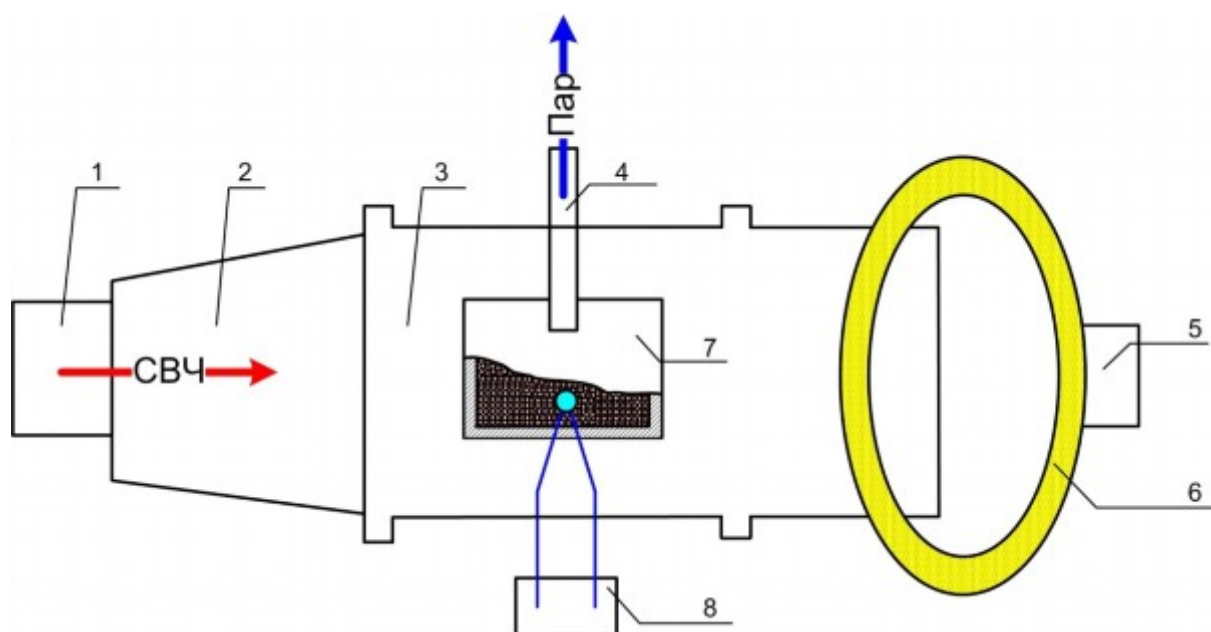


Рис. 2.1. Схема установки для обработки материалов:

1 – СВЧ-генератор; 2 – волновод; 3 – камера; 4 – трубка для отвода пара;  
5 – измеритель проходящей мощности; 6 – водяной контур; 7 – ячейка для нагрева материалов; 8 – термопара с регистрирующим прибором

При температуре материала 70 °С на термограммах нагрева в СВЧ-поле (рис. 2.2) наблюдается площадка, величина которой зависит от количества влаги и потребляемой мощности. Эта площадка соответствует эндотермическому процессу удаления большей части содержащейся в образце влаги. В опыте 2 проанализировали пробу, извлеченную из камеры после пребывания в течение четырех минут при 70 °С (конец площадки), к этому моменту степень удаления влаги составила 74,9 %, остаточная влажность – 2,4 %.

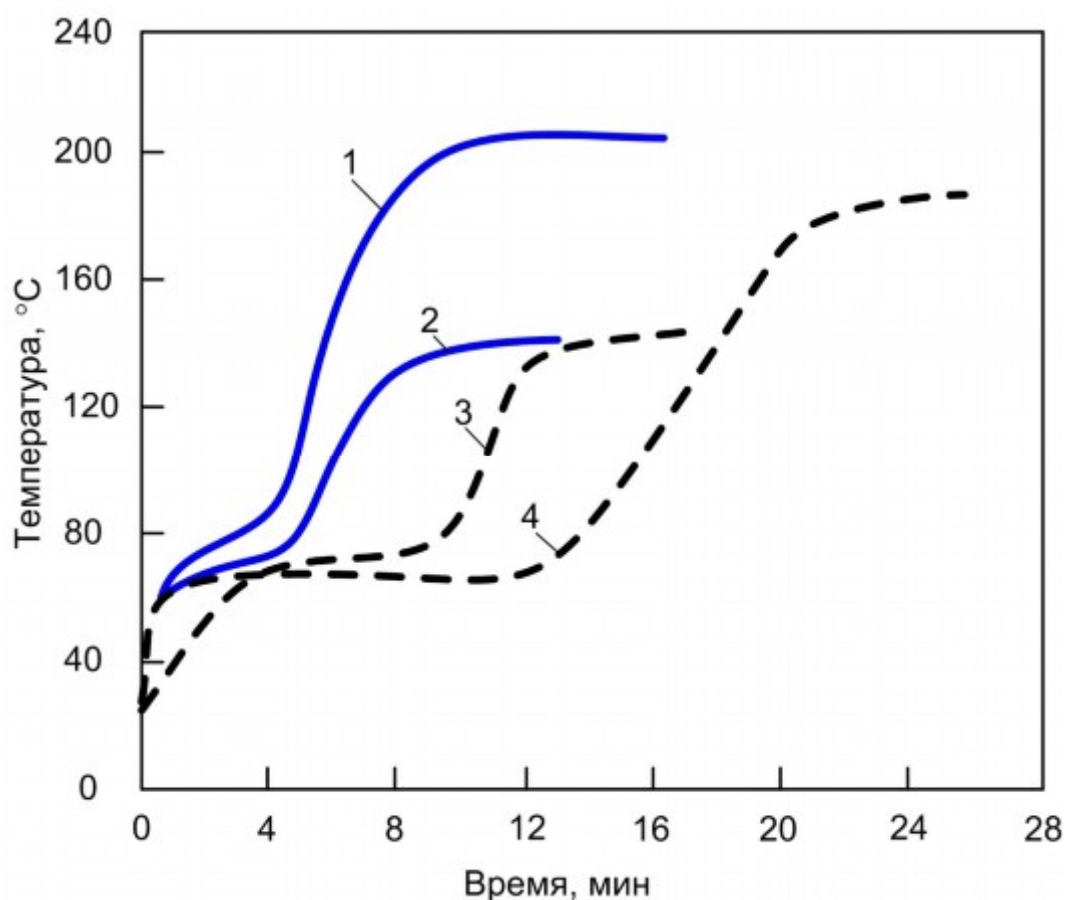


Рис. 2.2. Термограммы нагрева оленегорского суперконцентрата в СВЧ-поле при влажности 10 (—) и 15 (— · —) %. Цифры у кривых соответствуют номерам опытов

При исходных влажностях концентрата 10 и 15 % пятиминутная сушка после нагрева до 140 °С обеспечивает удаление более 85 % воды, остаточная влажность материала не превышает 0,6 %. При повышении

температуры до 160–200 °С для влажных концентратов (исходные влажности 15 и 18 %) имеет место незначительное окисление пробы, об этом свидетельствует снижение содержания монооксида железа с 30,5 до 27,3–28,0 % в опытах 4 и 5. По-видимому, ускорение окисления с ростом влажности определяется кинетическими причинами и обусловлено облегчением сорбции кислорода вместе с молекулами воды на поверхности крупинок концентрата.

Таким образом, применение энергии СВЧ-полей является вполне приемлемым для сушки суперконцентратов. Отсутствие продуктов сгорания и трущихся поверхностей обеспечивает чистоту высушенного концентрата. Оптимальным режимом сушки следует считать температуру 140 °С и выдержку при этой температуре в течение 5 мин. При этом общая длительность процесса составит 15 мин. Учитывая высокий коэффициент поглощения влажным концентратом энергии СВЧ-поля, можно считать, что потери энергии в промышленной установке в теплоизолированной камере не превысят 10 %. По данным лабораторных испытаний, расход электроэнергии на сушку оленегорского концентрата влажностью 15 % составляет 0,1 МВт·ч/т. Результаты работы могут быть использованы при разработке конструкций агрегатов для сушки тонкозернистых материалов в СВЧ-полях.

## **2.2. Разработка технологии обогащения лисаковских гидрогетитовых руд с использованием энергии сверхвысоких частот**

Лисаковский горно-обогатительный комбинат спроектирован для переработки бурожелезняковых руд Лисаковского месторождения. По вещественному составу и технологическим свойствам руды месторождения являются весьма сложными. Причем содержание железа в большей части труднообогатимой руды составляет 37,1 %, что значительно ниже предусмотренной технологической схемой обогащения (41 %). Руда такого состава может обогащаться только по магнитной, либо обжигмагнитной схемам обогащения. Вследствие того, что вещественный состав руды не обеспечивает ее эффективной переработки по схеме гравитационно-магнитного обогащения, потребовались новая технология и высокоэффективное оборудование.

Для исследования процессов при нагреве лисаковских руд и продуктов частичного обогащения использовали пробу руды текущей добычи, из которой получили грубый концентрат, подвергнутый воздействию СВЧ-полей. Проба, принадлежащая к типу рыхлых оолитовых руд гидрогетитохристой структурно-минералогической разновидности, состояла из рыхлого и кускового материала. Рыхлый материал, составлявший основную



часть пробы, был представлен гидрогетитовыми оолитами и обломочным материалом различной крупности (песок, мелкий гравий), а также охристо-глинистым веществом (пелиты, алевроиты). Кусковой материал состоял из более или менее крепких кусков размером 30–100 мм, сложенных оолитами, сцементированными бурым железняком. В кусковой части присутствовали также безрудные куски серого цвета карбонатно-кварцевого состава. Основным рудообразующим минералом в пробе являлся гидрогетит. В состав оолитов кроме железа в заметных количествах входили глинозем, кремнезем и фосфор. Фосфор в гидрогетите был в сорбированном виде. Причем содержание фосфора находилось в прямой зависимости от содержания железа. В пробе в незначительном количестве присутствовали минералы фосфора (апатит и вавелит). При обогащении основная масса фосфора переходит в железный концентрат вместе с гидрогетитом. Алюминий и кремний присутствуют в гидрогетите в виде гелей и также перейдут в железный концентрат. Магнетит и ильменит встречаются в гидрогетите в виде редких включений, иногда они замещаются гидрогетитом. Основным минералом нерудной части пробы является кварц, концентрирующийся главным образом в обломочном материале. Размер зерен колебался в широких пределах – от 0,05–0,90 до 1,0–1,5 мм, в пелитовой и алевроитовой части присутствовали зерна кварца размером менее 0,05 мм. Основным глинистым минералом в пробе являлся каолинит. Распределение основных химических элементов по минералам приведено в табл. 2.1.

Таким образом, проба представлена в основном рыхлой оолитовой гидрогетито-охристой рудой. Основным железосодержащим минералом в пробе являлся плотный и охристый гидрогетит. Содержание железа в гидрогетите составляло 52,2–52,8 %, фосфора – 1,79–1,85 %. С гидрогетитом в пробе связано 96,6 % железа и почти 100 % фосфора. Содержание железа в исходной пробе 38,5 %.

Таблица 2.1

**Распределение основных химических элементов  
по минералам в пробе лисаковской руды**

Минералы	Содержание, %			
	Fe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P
Гидрогетит	96,6	81,3	10,0	99,8
Магнетит, ильменит	0,6	–	–	–
Силикаты	2,8	18,7	5,8	–
Кварц, опал	–	–	84,2	–
Апатит, вавелит	–	–	0,2	–

Концентрат химического состава, %: 46,5 Fe, 1,62 FeO, 9,07 SiO<sub>2</sub> получили методом высокоградиентной магнитной сепарации. Выход кон-

концентрата 60 %, извлечение железа в концентрат 73 %. По данным минералогического описания в грубый концентрат переходят свободные оолиты, сростки оолитов с нерудными минералами, обломки оолитов и оолитовые агрегаты, а также часть нерудных минералов, представленная в основном кварцем. Для повышения магнитных свойств грубого концентрата и эффективности дальнейшего обогащения его нагревали в полях СВЧ. Для чего использовали промышленные СВЧ-генераторы мощностью 0,65 кВт с частотой 2450 МГц и мощностью 25 кВт с частотой 915 МГц. Установка генератора мощностью 0,65 кВт была оснащена прибором для измерения мощности СВЧ-поля, поглощаемой исследуемой пробой. Излучаемая мощность второго генератора регулировалась путем изменения тока магнетрона.

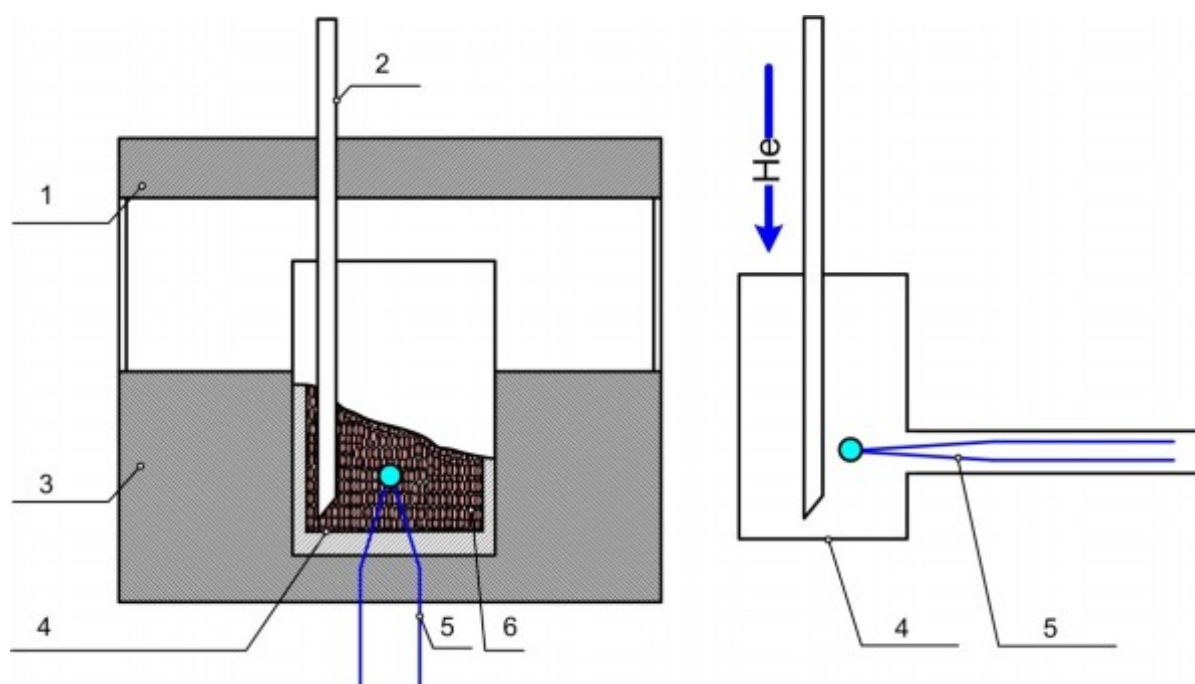


Рис. 2.3. Ячейки для нагрева материалов в поле СВЧ:

- 1 – крышка из огнеупорного материала; 2 – трубка из кварца для подвода газа;  
3 – подставка из огнеупорного материала; 4 – кварцевый реактор;  
5 – термопара; 6 – исследуемая проба

Для обработки материалов в поле СВЧ использовали ячейки (рис. 2.3), представляющие собой кварцевый реактор с отводком, помещенный в теплоизолирующий контейнер из огнеупорного материала, не поглощающего СВЧ-излучение. При необходимости через трубку сверху при помощи микровентили подавался инертный газ. Температуру образца измеряли хромель-алюмелевой термопарой и потенциометром КСП-4. На первом этапе исследований температуру измеряли периодически, опуская

термопару в середину исследуемой пробы при отключенном генераторе. В дальнейшем температуру измеряли непрерывно, при этом термопара располагалась перпендикулярно направлению распространения СВЧ-излучения в отводке реактора. При таком расположении СВЧ-излучение не вносит погрешности в измеряемую величину. Схема установки для обработки материалов в поле СВЧ представлена на рис. 2.4.

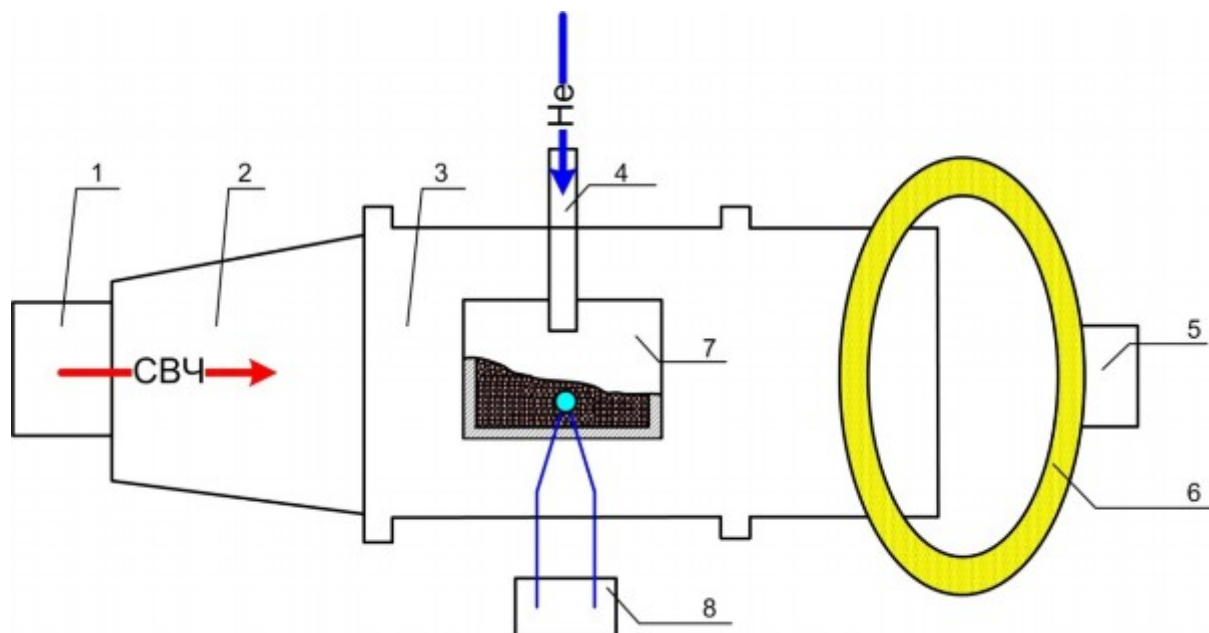


Рис. 2.4. Схема установки для обработки материалов в поле СВЧ:  
 1 – СВЧ-генератор; 2 – волновод; 3 – камера; 4 – трубка для подвода газа;  
 5 – измеритель проходящей мощности; 6 – водяной контур; 7 – ячейка для  
 нагрева материалов; 8 – термопара с регистрирующим прибором

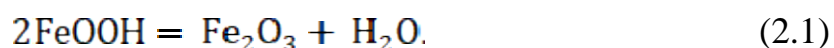
Как показали предварительные исследования, доля мощности, поглощаемой пробой, и скорость ее нагрева при заданном размере камеры определяется массой облучаемого материала. Так, в камере размерами 120×215 мм с генератором мощностью 0,65 кВт и частотой 2450 МГц пробы сухого лисаковского концентрата массой 12 и 39 г не нагревались. Для обеспечения нагрева до заданных температур (900 °С и выше) в этих условиях необходима проба массой около 150 г. В камере размерами 360×190 мм с генератором мощностью 25 кВт и частотой 915 МГц навеску концентрата массой в 150 г удалось нагреть лишь до 100–200 °С за 60 мин. Таким образом, исследования по нагреву в полях СВЧ необходимо проводить на пробах с оптимальной для данной установки массой, исключающей потери энергии в водяном контуре.

Влияние обработки в поле СВЧ на магнитные свойства концентрата оценивали по следующему методу. Из обработанной пробы отобрали 10 г

и при помощи постоянного магнита определили количество захваченной им фракции. До СВЧ-обработки магнитной фракции практически не было. В ходе опытов установлено, что материалы, выделяющие пары воды, необходимо нагревать в замкнутых реакторах, поскольку из-за высокой гигроскопичности огнеупорная подставка поглощает воду, что существенно влияет в дальнейшем на процесс нагрева.

Изучали влияние нагрева в поле СВЧ на магнитные свойства концентрата лисаковской руды [65]. На рис. 2.5 и 2.6 приведены типичные зависимости температуры проб лисаковского грубого концентрата с содержанием 46,5 % Fe от продолжительности выдержки в поле СВЧ, создаваемом генератором мощностью 0,65 кВт и частотой 2450 МГц, а также изменение поглощаемой мощности в ходе нагрева. Нагрев до заданной температуры осуществляли на полной мощности генератора, при ее достижении мощность снижали.

При 100 и 220–240 °С появляются две изотермические площадки (рис. 2.5). Очевидно, площадка при 100 °С отвечает процессу сушки концентрата, она наблюдается при всех процессах, связанных с удалением влаги (сушка кирпичей, концентратов). Отсутствие площадки на рис. 2.6 связано с тем, что нагреву подвергался предварительно высушенный концентрат. По мере удаления воды в процессе сушки происходит сильное уменьшение поглощаемой мощности, поскольку основная часть СВЧ-мощности поглощается на дипольных молекулах воды. Вторая площадка, наблюдаемая в интервале 220–240 °С (рис. 2.5), отвечает реакции разложения гидрогетита. Эти выводы подтверждаются данными дериватографического анализа лисаковского концентрата. Такие эндоэффекты связаны с удалением гигроскопической и гидратной влаги из гидрогетита. В связи с этим можно утверждать, что при нагреве в поле СВЧ при 110 °С имеет место сушка пробы, а при 220–240 °С – разложение гидрогетита по реакции



Наличие удаляющихся паров воды при температурах выше 200 °С подтверждается резким увеличением потребляемой СВЧ-энергии (рис. 2.5). Поглощение энергии сопровождается интенсивным нагревом пробы. По мере увеличения содержания гематита поглощаемая энергия увеличивается, однако скорость нагрева остается на постоянном уровне. Вероятно, дополнительная энергия расходуется на протекание эндотермической реакции (2.1) и компенсацию теплотерь с удаляемыми парами воды. При завершении реакции (2.1) излучаемая энергия поглощается почти на 90 %. Это дает возможность осуществить дальнейший прогрев прокаленной пробы и изучить свойства продуктов в зависимости от температурно-временных параметров термообработки.

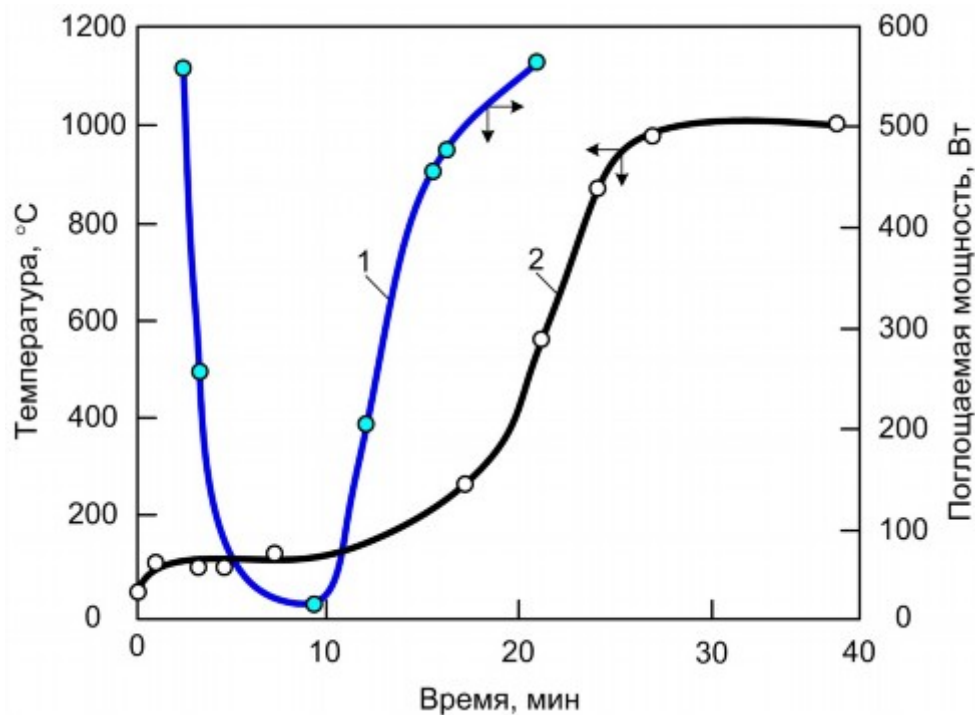


Рис. 2.5. Изменение поглощаемой мощности (1) и температуры (2) в процессе нагрева влажного лисаковского концентрата в поле СВЧ в зависимости от продолжительности термообработки (для опыта 13, табл. 2.2)

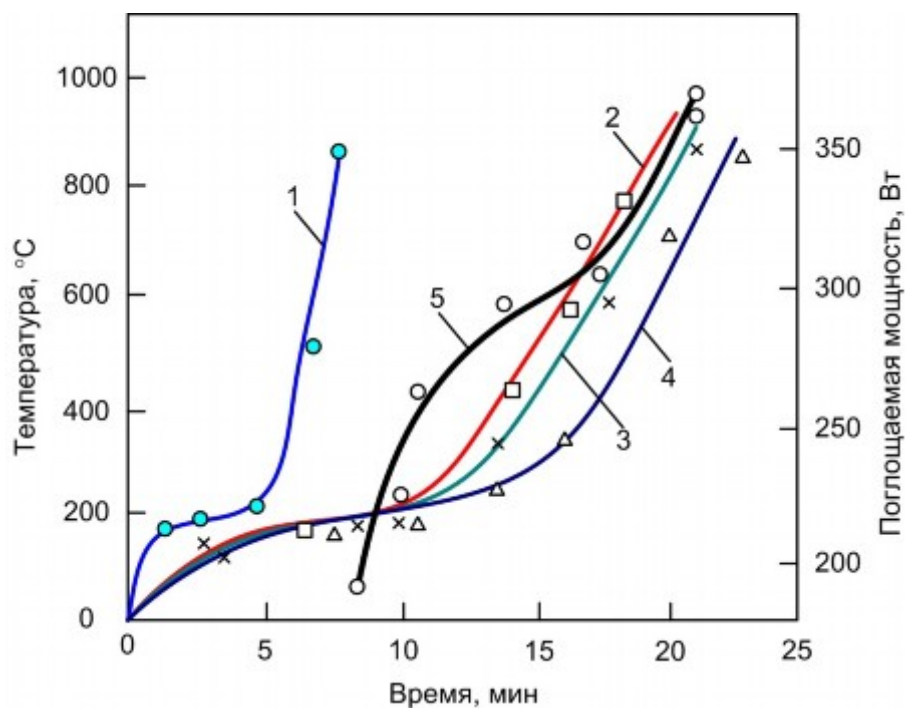


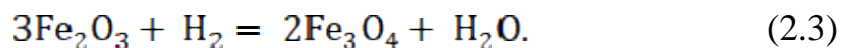
Рис. 2.6. Изменение температуры (1–4) и поглощаемой мощности (5) в процессе нагрева сухого лисаковского концентрата в поле СВЧ в зависимости от продолжительности термообработки: 1 – проба массой 200 г; 2–4 – пробы массой 150 г; 1, 2, 3, 4 – соответственно для опытов 3, 2, 5, 4 (табл. 2.2);

5 – для опыта 5 (табл. 2.2)

Результаты исследований представлены в табл. 2.2 и на рис. 2.7. До прокалики концентрат практически не обладает магнитными свойствами. Как видно из табл. 2.2, выход магнитной фракции, достигающий 78 %, определяется температурой и продолжительностью термообработки. При этом содержание FeO изменяется от 0,8 до 4,5 %. На рис. 2.7 кривые имеют отчетливый максимум при продолжительности выдержки 6–9 мин. С ростом температуры нагрева выход магнитной фракции увеличивается. Можно предположить, что экстремальный характер зависимости на рис. 2.7 обусловлен продолжительностью термообработки концентрата в среде собственного пара при 750–1100 °С, что, возможно, связано с диссоциацией молекул пара с образованием водорода:



и последующим восстановлением гематита:



О возможности этого механизма свидетельствует изменение содержания двухвалентного железа в обработанной пробе (табл. 2.2). Зависимость выхода магнитной фракции от содержания FeO показана на рис. 2.8. Как и следовало ожидать, рост содержания магнетита в пробе приводит к увеличению магнитной восприимчивости концентрата.

В связи с тем, что опыты проводили без обдувки инертным газом, увеличение продолжительности термообработки в отсутствии паров воды приводило к окислению магнетита кислородом воздуха и снижению выхода магнитной фракции. Для более детального объяснения эффекта появления магнитных свойств у ранее немагнитных материалов при температурах ниже температур диссоциации гематита и паров воды, а также природы возникающих фаз необходимо провести дополнительные структурно-фазовые исследования. Однако наличие магнитных свойств у прокаленных материалов позволяет применить для обогащения метод магнитной сепарации и оценить возможное качество полученного концентрата. Поскольку наибольший выход магнитной фракции наблюдался при 1000 °С и выдержке 6 мин, то именно при этих условиях была изготовлена партия продукта для исследования его обогатимости. Потеря массы в ходе нагрева составила 13–14 % для сухих и 21,5–23,0 % для увлажненных концентратов, что свидетельствует о полном удалении влаги и разложении гидрогематита.

Таблица 2.2

**Температурно-временные параметры обработки в поле СВЧ грубого лисаковского концентрата и свойства прогретого материала\***

Номер опыта	Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева, мин	Содержание FeO, %	Выход магнитной фракции, %	Потери массы, %
1	20	0	1,6	1,0	0
2	900	0	2,5	44,0	13,6
3	750	21	0,8	28,0	12,6
4	860	6	2,9	56,5	13,9
5	880	6	2,6	54,5	14,3
6	850	12	1,3	47,0	13,9
7	910	0	2,7	28,0	21,7
8	900	6	3,7	56,0	22,5
9	1100	0	4,5	76,0	22,5
10	880	12	3,4	68,0	23,1
11	780	9	—	53,0	21,5
12	1000	16	3,2	61,0	23,1
13	1000	8	4,2	78,0	21,6
14	1000	4	3,1	58,0	21,5
15	800	20	—	40,0	22,1
16	800	5	—	31,0	21,8

\*Содержание влаги в исходном концентрате: опыты 1–6 – 0 %; опыты 7–16 – 10 %.

Оценка эффективности применения СВЧ-полей для обогащения гидрогетитовых руд Лисаковского месторождения и определение возможных качественно-количественных показателей осуществлялись в процессе последующего магнитного обогащения прогретого материала. Возникновение ферромагнитных фаз при быстром нагреве гидрогетита позволило применить для дальнейшего обогащения метод магнитной сепарации в слабом поле. В то же время в прокаленном материале остается достаточное количество парамагнитных минералов, для доизвлечения которых необходимы магнитные поля высокой напряженности. Исходя из этого, в схеме испытаний обогатимости предусмотрена сепарация в слабом и сильном магнитных полях.



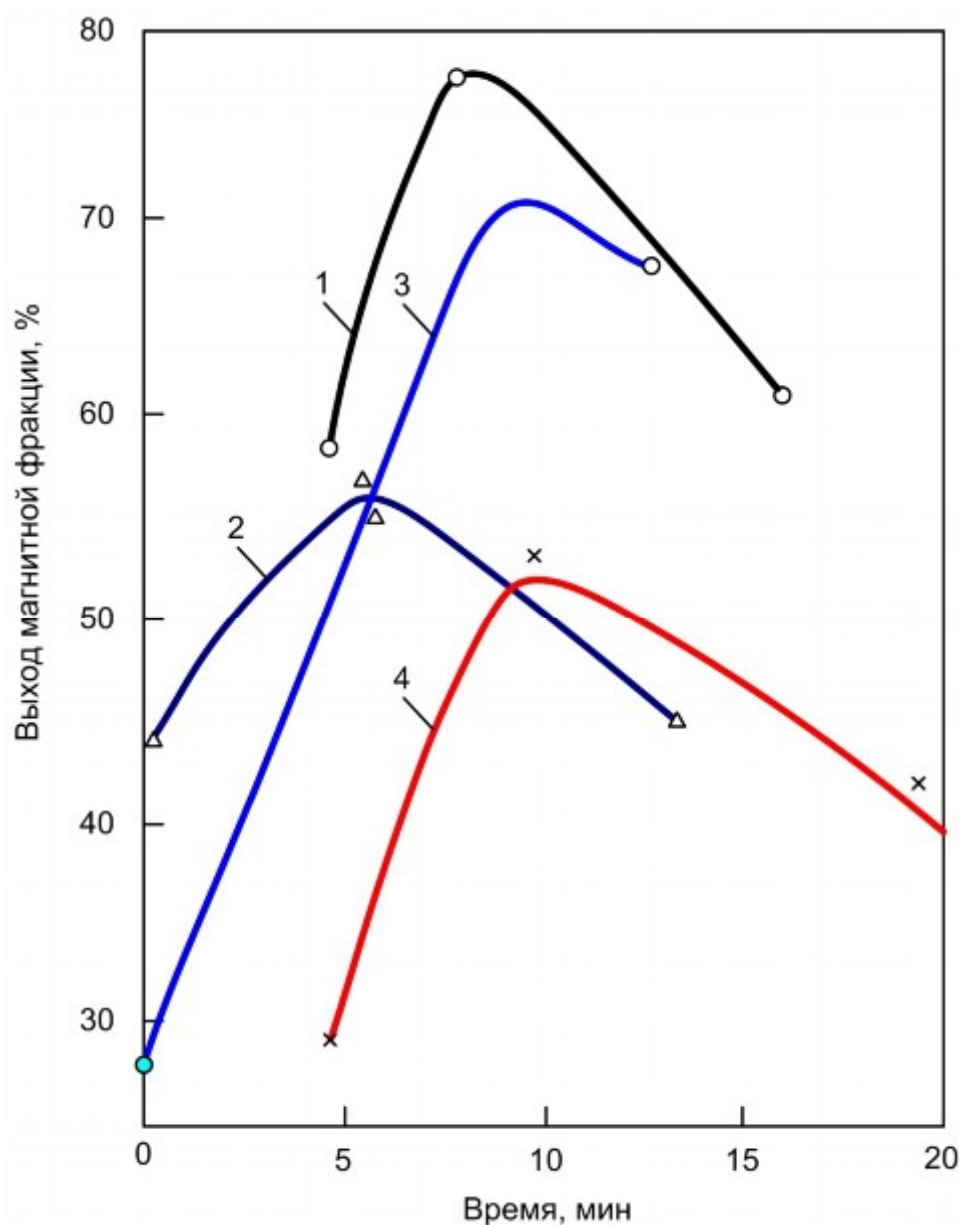


Рис. 2.7. Зависимость выхода магнитной фракции от продолжительности обработки лисаковского концентрата в поле СВЧ при различных температурах, °C:  
1 – 1000; 2, 3 – 900; 4 – 800

С целью определения оптимального верхнего предела измельчения, качества и выхода магнитных продуктов концентрат трижды доизмельчался. Крупность измельчения составила 0,0–0,4, 0,0–0,2, 0,0–0,1 мм. Провели магнитный анализ концентратов различной крупности.



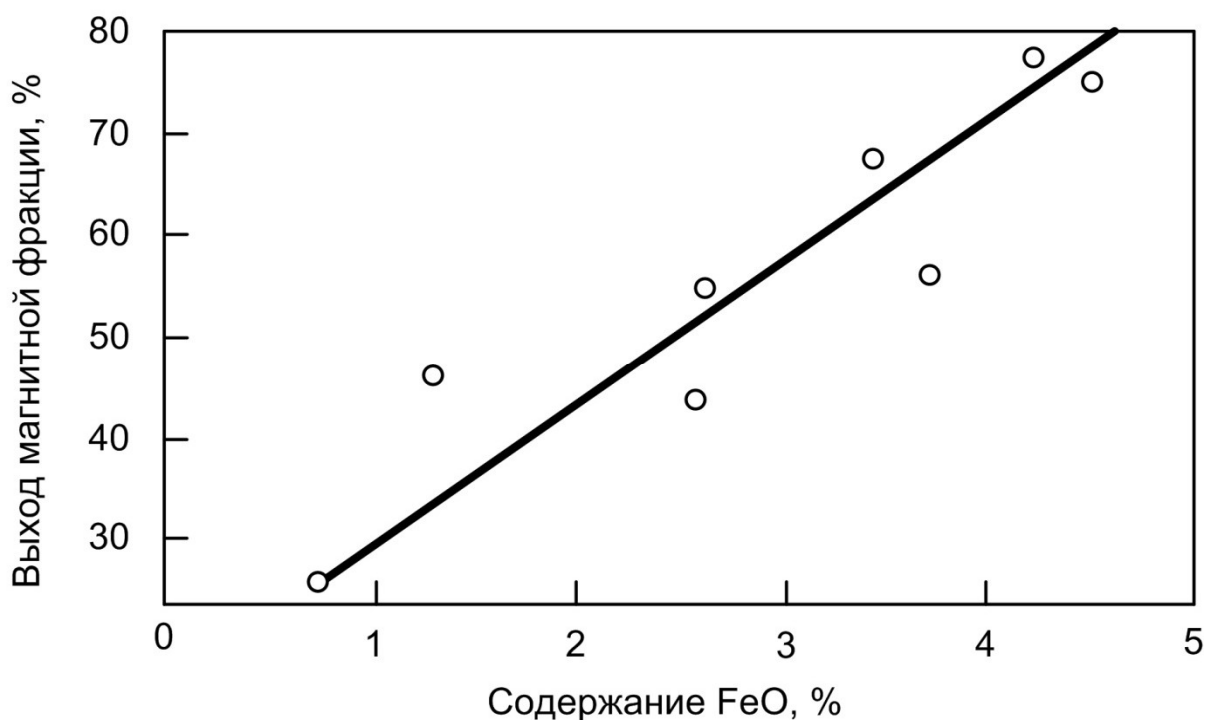


Рис. 2.8. Зависимость выхода магнитной фракции от содержания оксида железа в пробе после прокаливании в поле СВЧ

Опыты по магнитной сепарации в слабом поле выполняли на трубчатом анализаторе 25Т–СЭМ мокрым способом при напряженности магнитного поля 168 кА/м. Разделение в сильном поле материала крупнее 0,4 мм осуществлялось на индукционно-роликовом анализаторе 136–СЭ сухим способом, а материала мельче 0,4 мм – на полиградиентном анализаторе 208–СЭ мокрым способом. Продукты магнитного обогащения анализировались на содержание Fe, FeO, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Для исследования минерального состава были взяты пробы концентратов, прогретых в поле СВЧ при 850–900 °С в течение 0–12 мин (опыты 2, 4, 5, 6 в табл. 2.2). Во всех пробах наблюдались оолиты нескольких видов : 1) бурые оолиты круглой и овальной формы с блестящей или матовой поверхностью, целые; 2) бурые оолиты, частично потрескавшиеся и полуразрушенные, на некоторых сквозь трещины видна кварцевая сердцевина; 3) почти черные оолиты с неровной, часто бугристой поверхностью, иногда потрескавшиеся и полуразрушенные, и их как бы оплавленные агрегаты, в которых разрушенные оолиты имеют пористое внутреннее строение. Наибольшее количество оолитов третьего вида наблюдается в опыте 5, наименьшее – в опыте 6, в опытах 2 и 4 – примерно поровну. Состав оолитов, по данным рентгеноструктурного анализа, в основном гематитовый и магнетитовый.

Лисаковский грубый концентрат, прогретый в поле СВЧ при 1000 °С с выдержкой 8 мин, проанализировали по классам крупности:

– класс + 0,6 мм представлен редкими отдельными оолитами, скоплениями слипшихся (спекшихся), часто трещиноватых магнитных оолитов, а также сростками, обломками цемента и нерудными (в основном кварцем) минералами;

– класс – 0,6... + 0,3 мм в основном представлен оолитами и их обломками. Некоторые оолиты потрескавшиеся. Сростки, обломки цемента и нерудные минералы составляют до 15 %;

– класс – 0,3... + 0,15 мм; до 60 % класса представлено обломками оолитов; целые оолиты составляют до 25 %; сростки, обломки цемента и нерудные – около 15 %;

– класс – 0,15 мм; целые оолиты составляют до 1 %; обломки оолитов – 70 %; нерудные, в основном кварц – около 30–35 %.

Магнитные свойства концентрат приобретает за счет образовавшегося магнетита. По данным рентгеноструктурного анализа, рудная часть пробы состоит из дефектного гематита и магнетита.

В табл. 2.3 представлены данные по содержанию некоторых элементов в непрогретом и прогретом грубых концентратах.

Таблица 2.3

**Химический состав исследуемых концентратов**

Материал	Содержание, %		
	Fe	FeO	SiO <sub>2</sub>
Грубый непрогретый концентрат	46,50	1,62	9,07
Прогретый концентрат:			
опыт 2	52,62	2,49	–
» 4	53,03	2,89	–
» 5	52,24	2,56	–
» 6	52,31	1,32	–
при 1000 °С в течение 8 мин	52,85	3,75	10,50
Фракция, мм ( $t = 1000\text{ °C}$ , $\tau = 8\text{ мин}$ ):			
+0,6	42,20	3,73	–
– 0,6 ... + 0,3	55,90	3,74	–
– 0,30 ... + 0,15	54,70	3,55	–
– 0,15	51,60	4,39	–

Содержание железа и диоксида кремния в прогретых концентратах увеличивается в результате удаления внутренней влаги, а оксида железа – благодаря образованию магнетита по реакции (2.3).

Таким образом, под воздействием прогрева в поле СВЧ грубого концентрата, полученного из оолитовой гидрогетито-охристой руды, происходит изменение формы и состава оолитов. Основные железосодержащие минералы – гидрогетит и гетит – переходят в гематит и магнетит. Гематит представлен  $\alpha$ - и  $\gamma$ -гематитом. Последний обладает магнитными свойствами. Поэтому при незначительном увеличении оксида железа, связанного с магнетитом, выход магнитной фракции после прогрева в поле СВЧ возрастает в десятки раз. При обогащении P, Al и Si, связанные с гидрогетитом, вместе с железом переходят в концентрат. После прокалки в поле СВЧ в результате удаления внутренней влаги содержание элементов, связанных с гидрогетитом, возрастает. Частичное разрушение оолитов в процессе СВЧ-прогрева снижает затраты на измельчение.

Исследования по определению показателей магнитного обогащения концентратов, прогретых в поле СВЧ, проводились с четырьмя пробами из опытов 2, 4, 5, 6 (табл. 2.2). Пробы имели различную степень восстановления, содержание железа в прогретых концентратах изменялось в пределах 52,24–53,03 %. Поскольку образцы имели разную величину выхода магнитной фракции, то на данном этапе определяли зависимость показателей магнитного обогащения от выхода магнитной фракции.

Результаты магнитного обогащения представлены в табл. 2.4. Из прогретого концентрата крупностью 0,0–1,2 мм (первая стадия магнитной сепарации) получено 20,20–55,79 % концентрата методом магнитной сепарации в слабом поле. Содержание железа в концентрате 57,1–59,8 %. Промежуточный продукт магнитной сепарации обогащался методом высокоградиентной магнитной сепарации с целью доизвлечения железа и получения отвальных хвостов. Дополнительно получено от 38,92 до 72,47 % концентрата с содержанием железа 53,7–54,6 %, выход отвальных хвостов изменялся от 5,29 до 8,40 %. Для сравнения магнитная сепарация проводилась мокрым и сухим способами. Прогретый концентрат пробы 2 обогащался мокрым способом. Содержание железа в концентрате мокрой магнитной сепарации пробы 2 выше, чем в других опытах, и составляет 59,8 % но выход ниже – 20,2 %. Хвосты мокрой магнитной сепарации пробы 2 при выходе 7,3 % имеют высокое по сравнению с остальными содержание железа – 13,2 %. В целом извлечение железа в концентрат в пробе 2 меньше на 1,15–1,37 % по сравнению с пробами 4–6.

Полученные концентраты проб 4–6 доизмельчали до крупности 0,0–0,4 мм и направляли на вторую стадию магнитной сепарации. Увеличение степени измельчения прогретых концентратов (до 0,0–0,4 мм) вызывает повышение содержания железа в общем концентрате до 57,25–57,60 % и снижение содержания диоксида кремния. Если в концентрате пробы 2 содержание  $\text{SiO}_2$  равно 9,87 %, то в общих концентратах проб 4–6, для обогащения которых использовали две стадии магнитной сепарации, она составляет 7,28–8,07 %.

При сравнении результатов магнитного обогащения проб 4–6 видно, что несколько лучшие показатели получены при обогащении пробы 4, характеризующейся наиболее высоким содержанием магнитной фракции: на 1,8–2,4 % выше извлечение железа в концентрат, на 1,5–2,0 % выше выход концентрата и на 1,6 % ниже содержание железа в хвостах магнитной сепарации.

Дополнительно исследовали концентрат, полученный при условиях, обеспечивающих максимально высокий выход магнитной фракции: температура нагрева 1000 °С, продолжительность термообработки 8 мин. Схема испытаний обогатимости прогретого в поле СВЧ лисаковского концентрата при условиях, обеспечивающих максимально высокий выход магнитной фракции, не имеет принципиальных расхождений с испытаниями предыдущих проб. Основное различие состоит в том, что предусмотрены несколько стадий измельчения и магнитной сепарации. Конечная крупность измельчения для мокрой магнитной сепарации составляла 0,0–0,1 мм для высокоградиентной сепарации – 0,0–0,2 мм. Высокоградиентная сепарация осуществлялась с предварительным обесшламливанием. Тонкие фракции обогащались отдельно. Исследования ограничивали определением только качественной характеристики.

Результаты исследований показали, что увеличение степени измельчения до 0,0–0,2 мм и более не приводит к повышению показателей магнитной сепарации. Напротив, доизмельчение промежуточных продуктов приводит к дополнительным потерям железа в хвостах высокоградиентной сепарации шламов из-за некоторого переизмельчения оолитов гидрогетита.

По данным описанных исследований получены лучшие показатели с использованием сухих процессов магнитной сепарации. Несмотря на это, в испытаниях обогатимости последней пробы применена мокрая магнитная сепарация (в сильном и слабом поле), т. к. реализация схемы сухого обогащения на действующей фабрике невозможна.

Результаты обогащения прогретого лисаковского концентрата по стадийной схеме мокрой магнитной сепарации (измельчение до крупности 0,0–0,2 мм) приведены в табл. 2.5. Из прогретого грубого концентрата с содержанием общего железа 53,85 % получено 92,24 % концентрата с содержанием общего железа 56,98 %, диоксида кремния 8,85 %, оксида железа 3,73 %. Выход хвостов составил 7,76 % с содержанием железа 16,65 %.

При измельчении до 0,0–0,4 мм из данной пробы может быть получено 94,71 % концентрата, содержание железа в котором равно 56,27 %. Содержание железа в хвостах в этом случае составит 11,3 %, а выход хвостов – 5,29 %.

Таблица 2.4

**Показатели магнитного обогащения грубого концентрата,  
прогретого в поле СВЧ при 850–900 °С в течение 0–12 мин**

№ опы та	Продукты магнитного обогащения	Выход, %		Содержание, %					Извлечение железа, % от исходной руды
		по опе- рации	от исход- ной руды	Fe	FeO	SiO <sub>2</sub>	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
2	Концентрат ММС	20,20	10,65	59,80	8,89	7,24	0,013	0,88	16,50
	Концентрат ВГММС	72,47	38,22	54,60	0,96	10,60	0,013	0,78	54,20
	Общий концентрат	92,67	48,87	55,74	2,69	9,87	0,018	0,80	70,70
	Хвосты	7,33	3,87	13,20	—	—	—	—	1,30
	Исходный продукт	100,00	52,74	52,62	2,49	—	0,018	—	72,00
4	Концентрат СМС	46,00	24,18	58,41	5,21	7,14	0,019	0,86	36,70
	Концентрат ВГММС	44,06	23,16	56,04	<0,5	8,80	0,016	0,78	33,70
	Общий концентрат	90,06	47,34	57,25	—	7,95	0,018	0,82	70,40
	Хвосты	9,94	5,22	14,77	—	—	—	—	2,00
	Исходный продукт	100,00	52,56	53,03	2,89	—	0,017	—	72,40
5	Концентрат СМС	43,03	22,51	59,09	4,89	6,52	0,018	0,84	34,50
	Концентрат ВГММС	43,74	22,88	56,34	0,50	9,60	0,017	0,79	33,50
	Общий концентрат	86,77	45,39	57,70	—	8,07	0,017	0,81	68,00
	Хвосты	13,23	6,92	16,43	—	—	—	—	3,00
	Исходный продукт	100,00	52,31	52,24	2,56	—	0,016	—	71,00
6	Концентрат СМС	27,02	14,20	59,03	4,00	6,34	0,027	0,84	21,80
	Концентрат ВГММС	60,16	31,62	56,96	<0,50	7,70	0,028	0,81	46,80
	Общий концентрат	87,18	45,82	57,50	—	7,28	0,028	0,82	68,60
	Хвосты	12,82	6,74	16,32	—	—	—	—	2,80
	Исходный продукт	100,00	52,56	52,31	1,32	—	0,025	—	71,40

Таблица 2.5

**Результаты магнитного обогащения грубого концентрата  
с прогревом в поле СВЧ при 1000 °С в течение 8 мин**

Продукты магнитного обогащения	Выход, %		Содержание элементов, %					Извлечение железа, %
	по опе- рации	от ис- ходной руды	Fe	FeO	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	
Крупность 0,0–0,4 мм:								
концентрат ММС	35,81	18,88	60,33	7,57	5,11	0,80	—	29,60
концентрат ВГММС	58,90	31,06	53,73	—	—	—	—	43,40
общий кон- центрат	94,71	49,94	56,23	—	—	—	—	73,00
хвосты	5,29	2,79	11,30	—	—	—	—	0,80
исходный продукт	100,00	52,73	53,85	3,38	10,50	0,74	—	73,80
Крупность 0,0–0,2 мм:								
концентрат ММС	20,03	10,56	61,60	9,66	4,00	0,87	0,038	16,90
концентрат ВГММС	72,21	38,08	55,70	2,09	10,20	0,78	0,022	55,10
общий кон- центрат	92,24	48,64	56,98	3,73	8,85	0,80	0,025	72,00
хвосты	7,76	4,09	16,65	0,78	—	—	—	1,80
исходный продукт	100,00	52,73	53,85	3,38	10,50	0,74	—	73,80

Оптимальной крупностью измельчения прогретого концентрата для дальнейшего обогащения можно считать 0,0–0,4 мм. Для этой крупности по данным табл. 2.4 и 2.5 на рис. 2.9 построены зависимости содержания железа в общем концентрате и концентрате магнитной сепарации и извлечения железа в общий концентрат от содержания оксида железа, пропорционального степени магнитности материала после обработки в поле СВЧ. Рост содержания FeO вызывает закономерное повышение извлечения железа в концентрат. Однако при этом несколько снижается содержание железа в концентрате из-за дополнительного перехода пустой породы, связанной в сростках с магнитными оксидами железа. По-видимому, оптимальным следует считать содержание железа в концентрате на уровне 2,8–2,9 %, получаемого при температуре прогрева в полях СВЧ 800–860 °С (рис. 2.7, 2.8). При этом до минимума снижаются затраты на прокатку

и извлечение железа в концентрат превышает 70 %. Более точный выбор режима прокалики и обогащения может быть сделан после укрупненных испытаний и технико-экономических расчетов. Однако полученные данные достаточны для сравнения со способами обогащения гидрогетитовых руд без использования СВЧ-полей. Для сравнения необходимы данные по вещественному составу конечных концентратов. С этой целью исследовали конечные концентраты, полученные в процессе обогащения грубого концентрата, прогретого в поле СВЧ при 1000 °С в течение 8 мин.

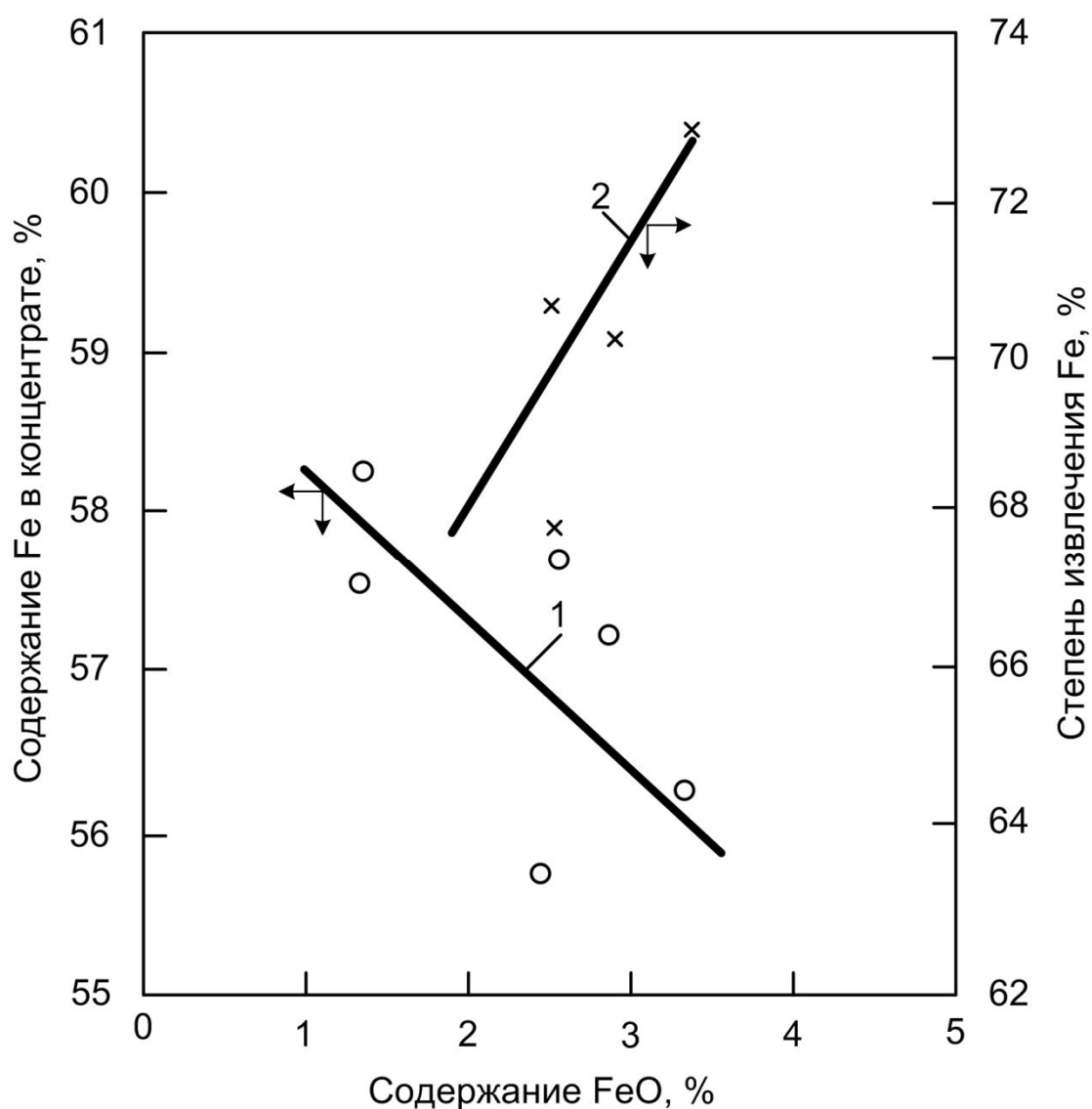


Рис. 2.9. Зависимость содержания железа в общем концентрате (1) и степени извлечения железа в концентрат (2) от содержания оксида железа

Магнитный концентрат мокрой магнитной сепарации, согласно данным рентгеноструктурного анализа, состоит из магнетита и гематита с дефектной структурой кристаллической решетки. Оптически при больших увеличениях наблюдается неоднородность состава оолитов. Нерудные минералы в этом концентрате представлены в основном кварцем и составляют около 1,0 %.

Концентраты высокоградиентной мокрой магнитной сепарации, выделенные в сильном магнитном поле, состоят большей частью из дефектного гематита и незначительной доли магнетита и нерудных минералов, представленных в основном кварцем (основная масса), полевыми шпатами, карбонатом и незначительно гранатом, пироксеном, биотитом, хлоритом, ставролитом. Рентгеноструктурный анализ показал, что дефектность кристаллической решетки гематита увеличивается с усилением напряженности магнитного поля. Оптически (под микроскопом) неоднородность состава оолитов наблюдается во всех концентратах. Химический состав концентратов, полученных по схеме глубокого обогащения и схеме с использованием СВЧ-полей, приведен в табл. 2.6.

Таблица 2.6

**Химический состав концентратов, получаемых по схеме глубокого обогащения и с использованием СВЧ-полей, %**

Концентраты	Концентрат ММС	Концентрат ВГММС	Общий концентрат	Концентрат глубокого магнитного обогащения
Fe <sub>общ</sub>	61,60	55,70	56,98	57,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	77,40	77,30	77,32	81,33
FeO	9,66	2,09	3,73	0,50
SiO <sub>2</sub>	4,00	10,20	8,85	6,92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,12	5,05	5,07	5,37
CaO	0,51	0,60	0,58	0,34
MgO	0,44	0,44	0,44	0,36
TiO <sub>2</sub>	0,11	0,21	0,19	0,20
MnO	0,40	0,28	0,31	0,23
P	0,87	0,78	0,80	0,80
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,13	—	—	0,11
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,04	0,03	0,03
K <sub>2</sub> O	0,05	0,11	0,10	0,16
ПМПП	0,41	1,69	1,41	12,38
C	0,17	0,28	0,26	0,40
S	0,04	0,02	0,03	0,02
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,80	2,00	1,75	1,29



$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$	—	—	0,07	0,06
--	---	---	------	------

Технология обогащения бурожелезняковых руд Лисаковского месторождения с использованием СВЧ-прогрева разработана на основании результатов исследований с учетом перевода фабрики на схему глубокого обогащения. Для сравнения рассмотрены две схемы: глубокого обогащения и обогащения с использованием СВЧ-прогрева.

Технологическая схема глубокого обогащения бурожелезняковых руд Лисаковского месторождения включает: грохочение исходной руды по классу 1,6 мм; измельчение класса +1,6 мм в стержневой мельнице до 0,0–1,2 мм; выделение шламов из класса 0,0–1,6 мм и измельченного материала крупностью 0,0–1,2 мм; высокоградиентную мокрую магнитную сепарацию класса 1,15–1,60 мм и измельченного материала крупностью 0,15–1,20 мм с выделением отвальных хвостов и грубого концентрата; доизмельчение грубого концентрата до 0,0–0,4 мм в шаровой мельнице; выделение тонкой фракции класса 0,0–0,074 мм из измельченного продукта; вторую стадию высокоградиентной мокрой магнитной сепарации грубого концентрата класса 0,074–0,4 мм с выделением отвальных хвостов и конечного концентрата; сгущение первичных шламов класса 0,0–1,6 мм и измельченного продукта крупностью 0,0–1,2 мм; основную высокоградиентную мокрую магнитную сепарацию шламов с получением концентрата и хвостов; сгущение концентрата основной высокоградиентной сепарации и класса 0,0–0,074 мм продукта второй стадии измельчения; перечистную высокоградиентную мокрую магнитную сепарацию класса 0,0–0,074 мм и концентрата 0,0–0,15 мм основной сепарации; обезвоживание и фильтрование зернистой фракции 0,074–0,4 мм и тонкой фракции 0,0–0,15 мм концентрата на ленточных и дисковых вакуум-фильтрах. Схема также включает сгущение крупной фракции хвостов до 40 % и их направление вместе с тонкой фракцией хвостов в шламохранилище; сгущение переливов обезвоживающих аппаратов перед высокоградиентной мокрой магнитной сепарацией, а также фильтров. Полученная вода используется в процессе в качестве оборотной. В схеме предусмотрено выделение металлических и посторонних предметов мокрой магнитной сепарации в слабом поле и на грохотах для защиты рабочей зоны высокоградиентных сепараторов от забивания.

Такая схема обеспечивает получение из руды с содержанием железа 38,5 % концентрата с содержанием железа 51,5 %. Выход концентрата составляет 51,0 %, извлечение железа в концентрат – 68,22 %. Содержание железа в хвостах не превышает 24,97 %. Удельный расход технологической воды составляет 11,57 м<sup>3</sup>/т исходной руды, а при условии наличия

внутрифабричного водопровода – 3,87 м<sup>3</sup>/т исходной руды. Среднечасовая производительность секции по руде составляет 484 т/ч. Запланированные показатели достигаются в результате стадийного измельчения и высокоградиентной мокрой магнитной сепарации руды и грубого концентрата с использованием высокопроизводительных роторных сепараторов 16 ЭРМ-250, стержневых и шаровых мельниц.

Предлагаемая схема обогащения лисаковских руд с использованием СВЧ-прогрева имеет ряд отличий. В схеме не предусматривается раздельное обогащение подрешетного (класс 0,0–1,6 мм) и измельченного надрешетного продуктов грохочения исходной руды, т. е. исходная руда измельчается по схеме с предварительным грохочением, обесшламливается и направляется на первую стадию высокоградиентной мокрой магнитной сепарации. В результате этих операций из исходной руды с содержанием 38,5 % выделяется 19,67 % отвальных хвостов с содержанием железа 22,50 %, 60,76 % грубого концентрата, содержащего 46,50 % железа и 19,57 % шламов, содержание железа в которых составляет 29,73 %. Грубый концентрат перед прогревом в поле СВЧ обезвоживается и фильтруется до 88 % твердого. Потеря массы прокаленного материала составила 13,60 %. Прогретый концентрат измельчается до крупности 0,0–0,4 мм. Для обогащения измельченного прогретого концентрата применяется мокрая магнитная сепарация, которая, по данным исследований, позволяет получить 18,43 % железного концентрата с содержанием 60,50 % железа. Промежуточный продукт мокрой магнитной сепарации обесшламливается и направляется на высокоградиентную мокрую магнитную сепарацию для доизвлечения железа и получения отвальных хвостов. Это позволит получить 21,10 % концентрата с содержанием железа 54,92 %. Узел обогащения шламов не претерпел изменений по сравнению со схемой глубокого магнитного обогащения. Несколько изменились показатели магнитной сепарации шламов. Содержание железа в концентрате возросло по сравнению со схемой глубокого обогащения на 1,17 %, выход концентрата уменьшился на 3,34 %.

В предлагаемой схеме также предусмотрены операции мокрой магнитной сепарации и контрольного грохочения для защиты рабочей зоны высокоградиентных сепараторов, сгущение переливов обезвоживающих аппаратов и крупной фракции хвостов. В схеме с использованием СВЧ-прогрева все концентраты объединяются и совместно обезвоживаются и фильтруются. Выход общего конечного концентрата составил 50,91 %, извлечение железа в концентрат – 74,41 %, что выше на 6,19 % по сравнению со схемой глубокого магнитного обогащения. Содержание железа в конечном концентрате по схеме с использованием полей СВЧ выше на 4,77 %, диоксида кремния – на 2,7 %, пятиоксида фосфора – на 0,1 %. При

одинаковом выходе содержание железа в хвостах в последней схеме ниже на 0,85 %. Удельный расход технологической воды составляет 9,36 м<sup>3</sup>/т, что на 2,2 м<sup>3</sup>/т меньше, чем по схеме глубокого обогащения.

Таким образом, схема с использованием СВЧ-нагрева позволяет из руды с содержанием 38,5 % железа получить 50,9 % концентрата с содержанием железа 56,27 % при извлечении 74,41 %, что на 6,19 % выше по сравнению со схемой глубокого магнитного обогащения.

Схема может быть реализована с использованием стадийной высокоградиентной мокрой магнитной сепарации руды в разрабатываемых сепараторах 16 ЭРМ-250 и СВЧ-прогрева грубого концентрата первой стадии.

Использование для обогащения прогретого концентрата метода мокрой магнитной сепарации в слабом поле, являющегося более экономичным и удобным в эксплуатации, дает возможность выделить 18,43 % богатого концентрата с содержанием железа более 60 %, в связи с этим количество материала, поступающего на вторую стадию высокоградиентной магнитной сепарации, уменьшится почти в 2 раза (до 23 %).

Частичное разрушение оолитов в процессе СВЧ-прогрева и невысокие температуры позволят снизить затраты на измельчение прогретого материала и обеспечат глубокое разделение рудных и нерудных минералов, не вступивших в твердофазное взаимодействие при температурах ниже 900 °С. В связи с этим существенным преимуществом предлагаемой технологии является возможность выделения богатого низкокремнистого концентрата, содержащего 61,6 %  $Fe_{общ}$ , 4,0 %  $SiO_2$ , 5,0 %  $Al_2O_3$  и имеющего отношение  $SiO_2/Al_2O_3 = 0,8$ . Такие низкомодульные концентраты могут быть использованы для комплексной переработки лисаковских руд. Схема включает их сепаратное окускование, доменную плавку агломератов на фосфористо-ванадиевый чугун и получение геленитовых шлаков, пригодных в качестве сырья для производства глинозема и цемента. Исходя из выхода богатого концентрата (18,43 %) следует ожидать, что из глиноземистых шлаков можно получить до 100 тыс. т/год глинозема и 1 млн. т цемента. По сравнению с получением аналогичных видов продукции в специализированных производствах это обеспечит значительную экономию. Кроме того, указанные особенности технологии обогащения с использованием СВЧ-нагрева обеспечат экономию материальных затрат в ходе обогащения.

С целью определения капитальных и эксплуатационных затрат, оптовых цен на концентраты по предложенным схемам обогащения бурожелезняковых руд Лисаковского месторождения, а также для сравнения схем и выбора эффективной по показателю прибыли схемы выполнены ориентированные технико-экономические расчеты, которые показали следующее. Учитывая прибыль от комплексной переработки лисаковских руд с получением глинозема и цемента, можно ожидать, что внедрение новой технологии обогащения с использованием СВЧ-нагрева обеспечит значи-

тельный экономический эффект в народном хозяйстве. Срок окупаемости капитальных вложений не превышает четырех лет. В то же время экономический эффект при схеме глубокого обогащения без СВЧ-нагрева составляет значительно меньшую величину (примерно в три раза) при сроке окупаемости капитальных вложений 7 лет. Таким образом, ориентированный расчет показывает, что модернизация схемы обогащения руд Лисаковского ГОКа должна предусматривать выпуск обезвоженного концентрата, получаемого при СВЧ-нагреве продуктов обогащения. Это обеспечит выпуск более дорогих концентратов и даст возможность окупить капитальные затраты в срок, значительно меньше нормативного.

Таким образом, в работе приведены результаты исследований по изысканию возможности применения электромагнитных волн СВЧ-диапазона для интенсификации процессов обогащения и переработки руд и концентратов в черной металлургии применительно к рудам Лисаковского месторождения.

Установлено, что обработка лисаковских гидрогетитовых руд и концентратов в полях СВЧ частотой 2450 и 915 МГц позволяет нагревать материал до температур дегидратации гидрогетита. Материал после кратковременной прокалики приобретает магнитные свойства в результате образования магнетита и частичного восстановления гематита до магнетита в полях СВЧ [66].

В наибольшей мере СВЧ-энергию лисаковские концентраты поглощают в температурном интервале выделения воды и после образования гематита. При этом расход электроэнергии на удаление кристаллогидратной влаги в интервале температур 200–700 °С составит 100 кВт·ч/т концентрата. Для переработки 6 млн. т концентрата в год суммарная мощность генераторов составит 70 МВт.

Определены показатели процесса обогащения прокаленных в поле СВЧ проб грубого концентрата после первичной магнитной сепарации лисаковской руды. Оптимальные параметры по извлечению железа и его содержанию в концентрате получены при обогащении материала, прогретого в поле СВЧ при 860 °С в течение 6 мин. При этом извлечение железа достигало 70–71 %, содержание железа в объединенном концентрате составляло 57,0–57,5 %.

Разработана схема обогащения лисаковских руд с применением СВЧ-энергии для прокалики и магнетизации промежуточных продуктов обогащения. Ее сравнение с известной ранее схемой глубокого обогащения показывает, что извлечение железа повышается на 6,19 % при получении дегидратированного концентрата.

Использование СВЧ-нагрева в процессе обогащения лисаковских руд дает возможность выделять до 1,0 млн. т / год богатого концентрата, содержащего 61,6 % Fe<sub>общ</sub> и имеющего низкий кремниевый модуль

( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,8$ ), и обезвоженного концентрата с 56,0 %  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ . Богатый концентрат после агломерации может быть использован для получения галенитного шлака при доменной плавке фосфористого чугуна. Галенитный высокоглиноземистый шлак является хорошим сырьем для производства глинозема и цемента.

Технико-экономические расчеты показали, что схема обогащения с применением СВЧ более выгодна, чем схема глубокого обогащения без прокалики продуктов. За счет использования СВЧ-нагрева на Лисаковском ГОКе можно получить дополнительные прибыли.

### **2.3. Разработка способа окускования доменных шламов и мартеновских пылей с извлечением цинка при нагреве в полях СВЧ**

В настоящее время на предприятиях черной металлургии образуется большое количество пылей и шламов, использование которых в доменном переделе недопустимо из-за повышенного содержания цинка. Содержание железа в этих материалах составляет 40–70 %, а цинка – 1–6 %. В данном разделе, учитывая специфический способ нагрева материалов в полях сверхвысоких частот (СВЧ) [62, 67], предпринята попытка использования его для окускования отходов с утилизацией цинка. Для исследований были взяты цинксодержащие отходы Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК). В табл. 2.7 приведены их химический и гранулометрический составы.

Содержание общего железа исследуемых шламов удовлетворяет требованиям, предъявляемым к железосодержащему сырью. Высокое содержание цинка (2,7 и 5,6 %) не позволяет использовать эти шламы в шихте для агломерации. Содержание  $\text{CaO}$  и  $\text{SiO}_2$  в доменном шламе позволяет получать окускованный продукт требуемой основности без дополнительного офлюсования. Высокая доля твердого углерода в доменном шламе обусловлена выносом отходящими газами из печи наиболее тонких фракций кокса. Наличие восстановителя в шламе дает возможность существенно снизить расход углерода или не использовать вообще твердое топливо для восстановления оксидов железа и цинка.

Доменный шлак содержит частицы широкого диапазона крупности с преобладанием мелких. Мартеновская пыль является тонкодисперсной,

в ней примерно 98 % частиц класса  $<0,063$  мм. Как шламы, так и пыли без

дополнительного измельчения могут быть окускованы окомкованием, брикетированием и спеканием неокомкованной шихты. В связи с этим проанализированы возможности использования СВЧ-нагрева для возгона цинка из всех указанных окускованных материалов НТМК.

Таблица 2.7

**Химический и гранулометрический составы  
цинкосодержащих отходов НТМК**

Химический и гранулометрический составы	Цинкосодержащие отходы	
	Доменный шлак	Мартеновская пыль
Химический состав, %:		
Fe <sub>общ</sub>	44,5	53,2
FeO	8,9	<0,5
CaO	6,6	<0,1
SiO <sub>2</sub>	5,7	0,6
MgO	1,2	0,8
TiO <sub>2</sub>	0,7	<0,01
S	0,4	2,2
Zn	2,7	5,6
C <sub>тв</sub>	10,9	0,1
Содержание, %, фракции, мм:		
>0,63	0,08	—
0,40–0,63	0,08	—
0,31–0,40	0,04	—
0,20–0,31	4,80	—
0,16–0,20	4,40	—
0,10–0,16	20,40	—
0,063–0,10	20,70	1,60
0,05–0,063	15,80	6,00

<0,05	31,90	92,40
-------	-------	-------

Для удаления цинка из всех цинкосодержащих отходов НТМК возможно совместно окусковывать доменные шламы и мартеновскую пыль в соотношении 4:1. Учитывая, что ежегодно на НТМК образуется до 100 тыс. т цинкосодержащих отходов при их полной утилизации с возгоном цинка, необходимо использовать высокопроизводительные агрегаты (тарельчатые или барабанные грануляторы), на которых получают окатыши. В связи с этим из смеси шламов и пылей готовили лабораторные окатыши, по своим свойствам не отличающиеся от промышленных.

В связи с тем, что количество мартеновских пылей не превышает 15 тыс. т в год, возгон цинка из них может быть реализован на серийных СВЧ-генераторах, и проведение опытов только с мартеновскими пылями вполне актуально. В качестве восстановителя использовали коксовую пыль. Чтобы смесь не плавилась в температурном интервале возгонки цинка, добавляли огнеупорный материал – дунит.

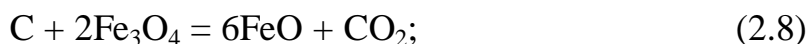
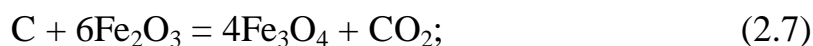
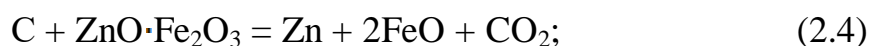
Смесь мартеновской и коксовой пыли использовали либо в виде таблеток, изготовленных на специальной машине, либо в насыпной массе. Содержание углерода в смеси было равно 9 % и должно обеспечить частичную металлизацию железа и возгон цинка.

Для обработки материалов в полях СВЧ использовали кварцевый реактор (рис. 2.3). При необходимости сверху подавали инертный газ. Температуру материала измеряли хромель-алюмелевой термопарой и потенциометром КСП-4 (рис. 2.4).

В табл. 2.8 приведены основные параметры, при которых в полях СВЧ нагревали окатыши, таблетки и неокомкованную шихту из отходов НТМК. На рис. 2.10 и 2.11 представлены термограммы нагрева и кривые поглощения энергии для всех опытов. Нумерация опытов в табл. 2.8 и кривых рис. 2.10 и 2.11 совпадают. Характер нагрева проб массой 70–100 г при постоянной выходной мощности генератора 0,65 кВт идентичен для всех опытов (рис. 2.10). В интервале температур 20–800 °С, где оксиды не восстанавливаются, скорость нагрева и поглощаемая мощность постоянны: 50–60 °С/мин и 0,60 кВт. Начало восстановительных процессов при температуре выше 800 °С сопровождается некоторым снижением потребляемой мощности и резким замедлением нагрева, скорость которого составляет 10 °С/мин. Это связано со следующим. Во-первых, уменьшение количества СВЧ-энергии, захватываемой пробой, свидетельствует об изменении типа



проводимости. Во-вторых, это обусловлено значительными затратами теплоты на компенсацию эндотермических реакций в нагреваемом материале, стехиометрическая запись которых имеет следующий вид:



При высоких температурах реакции (2.4)–(2.10) протекают совместно. Учитывая летучесть металлического цинка при температурах выше 900 °С, можно утверждать, что при температурах выше 800 °С выделяется смесь газов CO, CO<sub>2</sub> и Zn<sub>пар</sub>. Присутствие в газах значительного количества цинка подтверждается анализом конденсата, снятого с трубки, отводящей газ из кварцевого реактора. В нем содержится 40–60 % Zn.

Таблица 2.8

**Температурно-временные параметры обработки<sup>1</sup> в поле СВЧ цинкосодержащих шламов НТМК  
и химический состав исходных и обожженных материалов**

Номер опыта	Состав материала	$t_{\text{обж}},$ °C	$\tau_{\text{обж}},$ мин	Zn <sub>исх</sub> , %	C <sub>исх</sub> , %	Zn <sub>кон</sub> , %	Степень удаления Zn, %	Zn в воз- гоне, %	C <sub>кон</sub> , %	FeO <sub>кон</sub> , %	Fe <sub>мсж</sub> , %
1	Окатыши: 80 % доменных шламов + 20 % мартенов- ской пыли	1080	7	3,00	8,80	1,36	54,7	>60	0,09	19,4	47,3
2	Смесь окатышей разного состава	1070	0	4,19	3,02	2,75	34,4	25	0,05	47,7	47,0
3	Таблетки: 91 % мартенов- ской пыли + 9 % кокса	1190	0	4,56	7,66	2,14	53,5	43,5	–	47,9	7,74
4	То же	1000	5	4,56	7,66	3,88	14,9	–	–	51,2	8,93
5	То же	1000	0	4,56	7,66	3,90	14,9	–	0,29	55,1	6,88
6 <sup>2</sup>	То же	1120	0	4,56	7,66	2,90	36,4	26,9	2,42	51,0	4,21
7 <sup>2</sup>	То же	1070	0	4,56	7,66	3,58	27,9	–	1,36	36,6	1,88
8	Неокомкованная шихта: 82 % мартеновской пыли + 8 % коксовой пыли + 10 % дунита	1000	10	3,49	6,89	4,00	–	–	2,47	52,1	1,48
9	То же	1045	0	3,49	6,89	2,90	16,9	–	0,67	49,0	3,64
10	То же	1000	10	3,49	6,89	4,00	–	–	–	54,5	1,65
11	Неокомкованная шихта: 80 % мартеновской пыли + 10 % коксовой пыли + 10 % дунита	1220	0	3,41	8,49	3,66	–	–	3,68	17,6	1,13
12	То же	1230	6	3,41	8,49	0,51	85,0	17,3	0,22	39,4	19,10
13	То же	1150	3	3,41	8,49	3,47	–	–	3,54	44,8	1,42

<sup>1</sup>Во всех опытах атмосфера He, в опыте № 7 – CO<sub>2</sub>; <sup>2</sup>Прочность 48 Н/окатыш; <sup>3</sup>Прочность 52 Н/окатыш

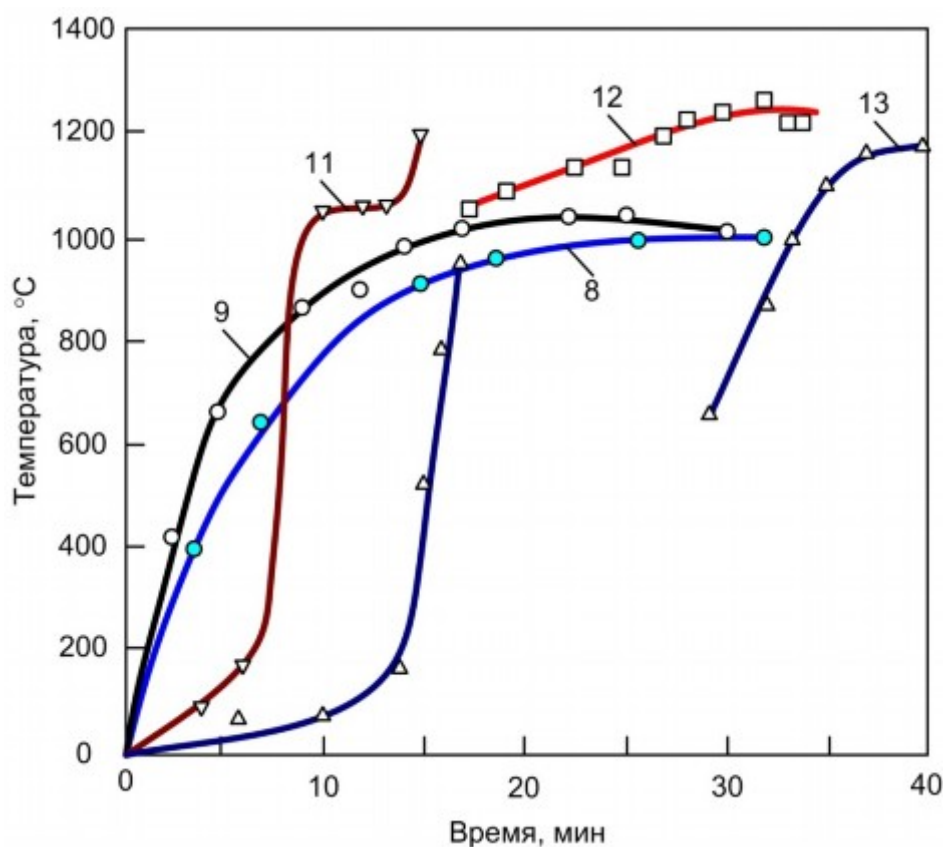


Рис. 2.10. Термограммы нагрева гранул из цинкосодержащих шламов НТМК в поле СВЧ (цифры у кривых – номера опытов по табл. 2.8)

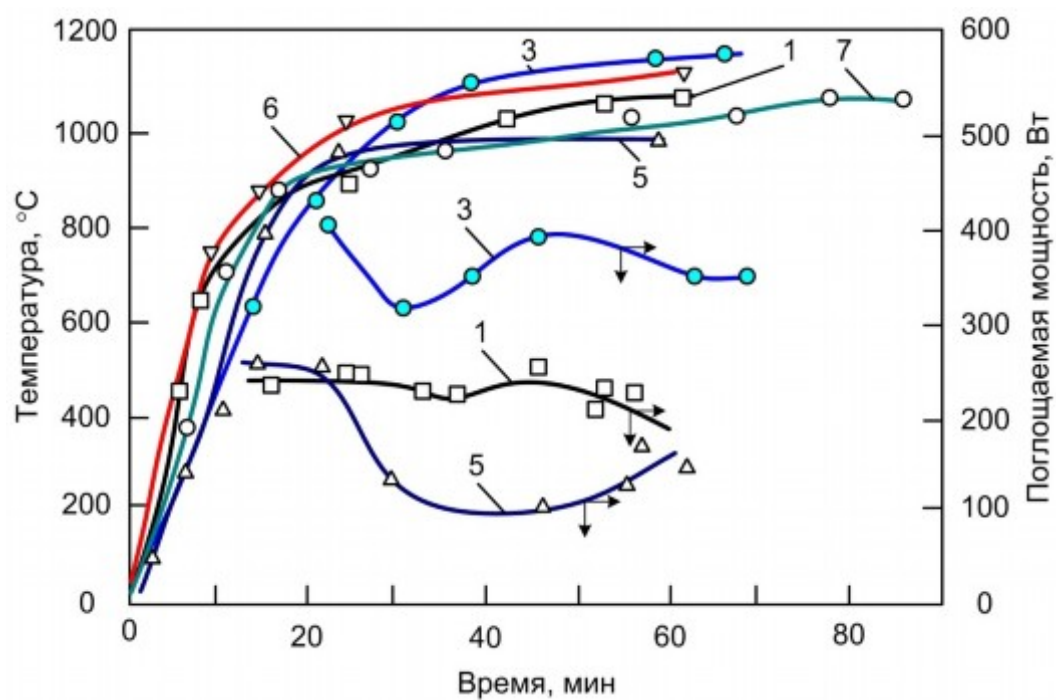


Рис. 2.11. Термограммы нагрева неокмкованных цинкосодержащих шламов НТМК в поле СВЧ (цифры у кривых – номера опытов по табл. 2.8)

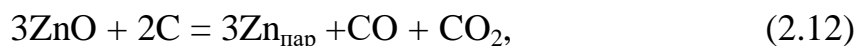
Ускорить процесс нагрева и поднять температуру до требуемой для полного возгона цинка при реальных для технологии временах возможно только увеличением мощности генератора. Действительно, из термограмм (рис. 2.11) видно, что в опытах 11–13, где использовался более мощный генератор (25 кВт), скорость нагрева в интервале температур 100–1000 °С составляет 200–300 °С/мин. В области восстановления (1000–1230 °С) из-за опасности оплавления образцов ток магнетрона снижался и скорость нагрева поддерживалась на уровне 20 °С/мин.

Порошкообразная шихта, расположенная в кварцевом реакторе слоем высотой 100 мм, прогревалась практически с той же скоростью, что и окатыши. Следовательно, использование СВЧ-техники позволяет упростить технологию окускования пылей и шламов, отказавшись от традиционной системы получения гранул.

Особенностью микроволнового нагрева является также зависимость доли поглощенной материалом энергии от геометрии его расположения в волноводе. Так, в опытах 3 и 5 (рис. 2.10) скорости нагрева образцов в высокотемпературной области, имеющих близкую массу 101 и 107 г и одинаковый химический состав, заметно различаются. Это объясняется использованием в опыте 3 кварцевого реактора меньшего диаметра, обусловившего более высокий слой таблеток при одинаковой массе. Указанные особенности нагрева сказались и на конечной температуре обжига, которая при использовании генератора малой мощности 0,65 кВт могла регулироваться только массой облучаемого материала и его расположением в волноводе. Из табл. 2.8 очевидно, что максимальная температура нагрева отразилась и на конечном составе образцов.

На рис. 2.12 представлены зависимости степени удаления цинка от максимальной температуры нагрева. Кривая 1 построена по результатам опытов нагрева окатышей в трубчатой печи электросопротивления. Рабочее пространство печи (диаметр 60 мм, высота 800 мм) продувалась гелием. Для опытов с таблетками (кривая 3) получена линейная зависимость степени возгона цинка от максимальной температуры нагрева. При максимальной температуре опытов (1190 °С) здесь достигнута достаточно большая степень возгона цинка (53 %) и металлизации железа (15 %). В интервале температур 800–900 °С наблюдается активная возгонка цинка из мартеновской пыли в полях СВЧ, сопровождаемая выделением белого дыма. Однако скорость реакции (2.4) и (2.5) при 800–1200 °С в условиях опытов с нагревом в полях СВЧ оказалась меньше, чем при радиационном нагреве с близкой скоростью (25 °С/мин) в трубчатой печи (рис. 2.12). Аналогичная ситуация имеет место и для окатышей из доменных шламов и мартеновских пылей.

Замедление скорости реакции связано с более высоким парциальным давлением паров цинка в небольшом по объему кварцевом реакторе, полностью заполненном таблетками, чем в трубчатой печи. Поэтому равновесие суммарных реакций восстановления



сопровождаемых выделением газообразного цинка, сдвигается влево. В результате скорость реакций, обратных (2.11) и (2.12), пропорциональна разности парциального давления цинка в газовой фазе и равновесного для процесса его испарения по реакции (2.6) в кварцевом реакторе для СВЧ-нагрева и превысит скорость реакций в трубчатой печи. Ускорить удаление цинка возможно только повышением температуры и соответствующим экспоненциальным ростом давления паров цинка по реакции (2.6). Это подтверждается кривой 5 (рис. 2.12).

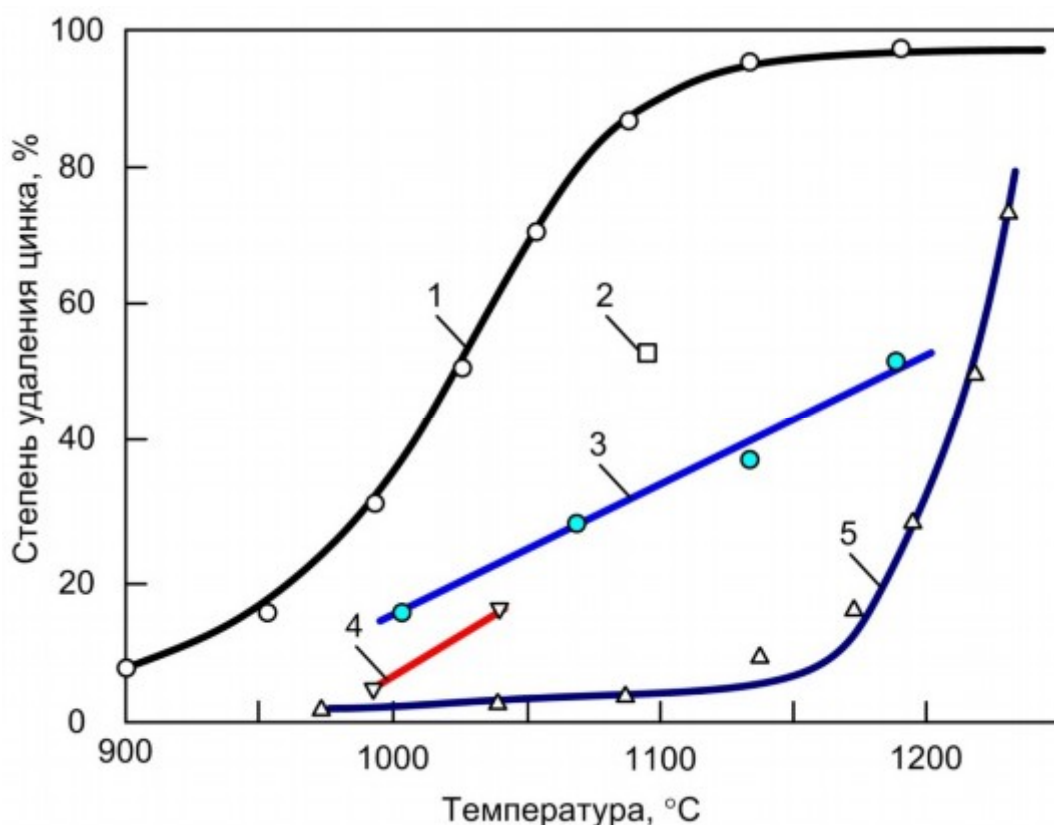


Рис. 2.12. Зависимость степени удаления цинка от температуры при нагреве в поле СВЧ и обычном нагреве (табл. 2.8):

- 1 – окатыши (№ 1, обычный нагрев со скоростью 25 °C); 2 – окатыши (№ 1, СВЧ, 25 кВт); 3 – таблетки (№ 3, СВЧ, 0,65 кВт); 4 – неокомкованная шихта (№ 8, СВЧ, 0,65 кВт);

Заметим, что несмотря на практически полное удаление цинка из неокомкованной шихты при 1220 °С, скорость обесцинкования при более низких температурах близка к нулю, хотя из таблеток цинк удаляется. Это еще раз подтверждает предположение о том, что в кварцевом реакторе для СВЧ-нагрева имеет место торможение восстановительных реакций из-за повышения концентрации газообразных продуктов. В случае нагрева таблеток, а особенно окатышей, газопроницаемость слоя выше, чем при укладке плотной шихты, и парциальное давление паров цинка в слое, естественно ниже. Этим обусловлено наибольшее обесцинкование окатышей при определенной температуре в исследуемом ряду материалов.

Очевидно, в производственных условиях, где укладка гранулированных материалов как для конвективного, так и для СВЧ-нагрева не будет различаться, оптимальная температура возгонки не должна превышать 1150 °С. В то же время, если пользоваться схемой без окомкования, то удаление цинка из плотного порошкообразного слоя шихты, уложенной на ленту, возможно только после прогрева материала до 1200–1220 °С.

Несмотря на сравнительно высокие температуры, добавки тугоплавкого дунита к смеси мартеновской пыли и кокса позволяют после облучения СВЧ-энергией извлекать материал из ячейки без признаков плавления. Это обеспечит возможность нормальной выгрузки спека с ленты в технологическом цикле.

В то же время отсутствие тугоплавкого компонента в шихте таблеток привело к их плавлению при 1190 °С (табл. 2.8). Снижение температуры до 1120 °С позволяет избежать оплавления, однако степени возгона цинка и прочности оказываются сравнительно низкими. Следовательно, тугоплавкая добавка обязательна в шихте таблеток для успешного испарения цинка и придания требуемых технологических свойств продукту, оставшемуся после возгонки.

Таким образом, кинетический анализ показал, что в условиях полей СВЧ возможен нагрев доменных шлаков и мартеновских пылей НТМК с возгоном цинка как в окомкованном (окатыши или таблетки), так и в неокомкованном виде. В последнем случае температуры возгона возрастают на 50–60 °С до 1200–1220 °С. Однако тугоплавкие добавки позволяют предотвратить оплавление материала в этом диапазоне температур и обеспечить высокую степень возгона цинка, равную 85 %. Сказанное позволяет рекомендовать способ окускования отходов без окомкования к промышленному использованию как наименее капиталоемкий. Ниже рассмотрены предложения по технологии этого процесса и расчет тепловой схемы соответствующего агрегата для прокалки.

Учитывая особенности СВЧ-нагрева, не требующего конвективного взаимодействия обжигаемого материала с теплоносителем, предлагается

осуществить возгонку цинка неокомкованной шихты, уложенной на специальную жаропрочную металлическую ленту марки «Стилбелтс», гибкость которой достаточна для использования в качестве конвейерной. В настоящее время подобная лента производится в Швеции и эксплуатируется на фирме «Оутокумпу» в Финляндии. Использование ленты «Стилбелтс» обеспечивает неоспоримые преимущества по сравнению с известными конвейерными тележками современных обжиговых машин. Снижение металлоемкости и теплотеря на нагрев агрегатов с повышенной массой приведет к экономии материальных и энергетических ресурсов.

Схема конвейерного агрегата с использованием ленты «Стилбелтс» приведена на рис. 2.13. На нем выделены две технологические зоны: сушки и подогрева; восстановительного обжига. В связи с тем, что уровни энергозатрат в температурном интервале 20–800 °С, где восстановление не протекает, и 810–1230 °С, где возгоняется цинк и металлизуется железо, значительно различаются, предлагается осуществить отдельный ввод СВЧ-энергии по указанным зонам. Можно ориентировочно принять (рис. 2.10), что суммарный расход электроэнергии на нагрев пробы массой 110 г до температуры 1200 °С, достаточной для возгонки большей части цинка, достигается за 60 мин. При этом средняя потребляемая мощность равна 400 Вт. Следовательно, удельный расход электроэнергии  $Q = (0,4 \text{ кВт} \cdot 3600 \text{ с}) : 0,11 \text{ кг} = 13091 \text{ кДж/кг} = 3,6 \text{ кВт/кг} = 3,6 \text{ МВт/т}$ .

Учитывая, что для возгона цинка из мартеновской пыли необходимо добавить к ней 9 % коксовой пыли и 10 % дунита, суммарная масса материала, поступающая на переработку, составит 17,85 тыс. т. Принимая обычное количество рабочих часов в году равным 7900 ч при коэффициенте использования оборудования 0,9, получим, что требуемая производительность агрегата для переработки всех пылей составит 2,26 т/ч. Тогда суммарная полезная мощность СВЧ-генератора  $N = 3,6 \text{ МВт} \cdot \text{ч/т} \cdot 2,26 \text{ т/ч} = 8,14 \text{ МВт}$ .

Поскольку время сушки и подогрева шихты до температуры начала восстановления в три раза меньше, чем требуемое для возгона цинка и металлизации железа, можно принять распределение полезной мощности генераторов СВЧ следующим:  $N_1 = 2 \text{ МВт}$ ;  $N_2 = 6 \text{ МВт}$ .

Ввод мощности СВЧ вызовет испарение воды в зоне сушки и выделение газов по реакциям (2.4)–(2.10). Для удаления газообразных продуктов предусмотрена система зонтов, подсоединяемых к вентилятору. Теплотехнические расчеты показали, что температура газов над слоем спекаемого материала в зоне сушки будет равна 100 °С, а в зоне обжига – 1200 °С. Определяя объем выделяемых газов по реакциям (2.4)–(2.10) и проводя расчеты, установили, что подача дымовых газов из слоя на фильтры невозможна из-за высоких температур. Для улавливания цинка в цветной металлургии чаще всего применяют рукавные фильтры. Их тканевые мешки



работают при 110–160 °С, поэтому для снижения температуры дыма до 130 °С предусмотрен организованный подсос воздуха. Для предотвращения попадания воздуха непосредственно над спекаемым слоем рекомендуется установить промежуточный горн (пунктир на рис. 2.13). В этом случае вследствие небольшого избыточного давления выделяющихся газов образуется газовый затвор в точке соприкосновения зонтов. В результате над лентой находятся бескислородные газы, и углерод шихты не выгорает, а полностью расходуется на восстановление оксидов железа и цинка. Суммарный газовый поток собирается в пространстве между зонтами и просасывается через фильтры вентилятором в дымовую трубу. Выполненные расчеты показали, что содержание СО в сбрасываемых газах не превышает 3,5 %. С учетом малого содержания СО в газах и их небольшого расхода не требуется специальной газоочистки.

Обоженный и обесцинкованный продукт содержит 30–70 % Fe. Для его окускования продукт предполагается охлаждать в металлическом водоохлаждаемом бункере с помощью азота из баллонов или от трубопровода кислородной установки. Частично охлажденный спек подается в валковый пресс, где формируются металлизированные брикеты для мартеновского или доменного производства.

Таким образом, продуктами переработки мартеновских пылей будут металлизированные брикеты, а также уловленная в рукавных фильтрах цинкосодержащая пыль. Для расчета концентрации цинка в фильтрате необходимо принять количество железорудной пыли, выносимой из спекаемого слоя с отходящими газами. В связи с отсутствием аналогов с СВЧ-нагревом отходов примем обычный для производства окатышей и агломератов норматив пылевывоса 20 кг/т железорудного продукта. Принимая по данным опытов степень обесцинкования 85 % и содержание цинка в мартеновской пыли 5,6 %, получим массу удаляемого с газами цинка, равную 45,36 кг/т железорудного продукта. Следовательно, концентрация цинка в пыли ожидается равной 70 %. Этот продукт вполне пригоден для получения цинковых белил без предварительного вельцевания.

Предложенный тепловой агрегат включается в общую технологическую схему участка по переработке цинкосодержащих пылей, рассмотренную ниже.

На рис. 2.14 показаны последовательность технологических операций и оборудование, необходимое для организации производства по переработке цинкосодержащих пылей НТМК с использованием СВЧ-энергии. Предполагается завозить в мешках сухие компоненты шихты – мартеновскую пыль, коксовую пыль и молотый дунит. Пыль мартеновского и коксового производства имеет гранулометрический состав, пригодный для окомкования. Дунит используется в настоящее время в огнеупорном производстве НТМК, и измельчать его удобно там.

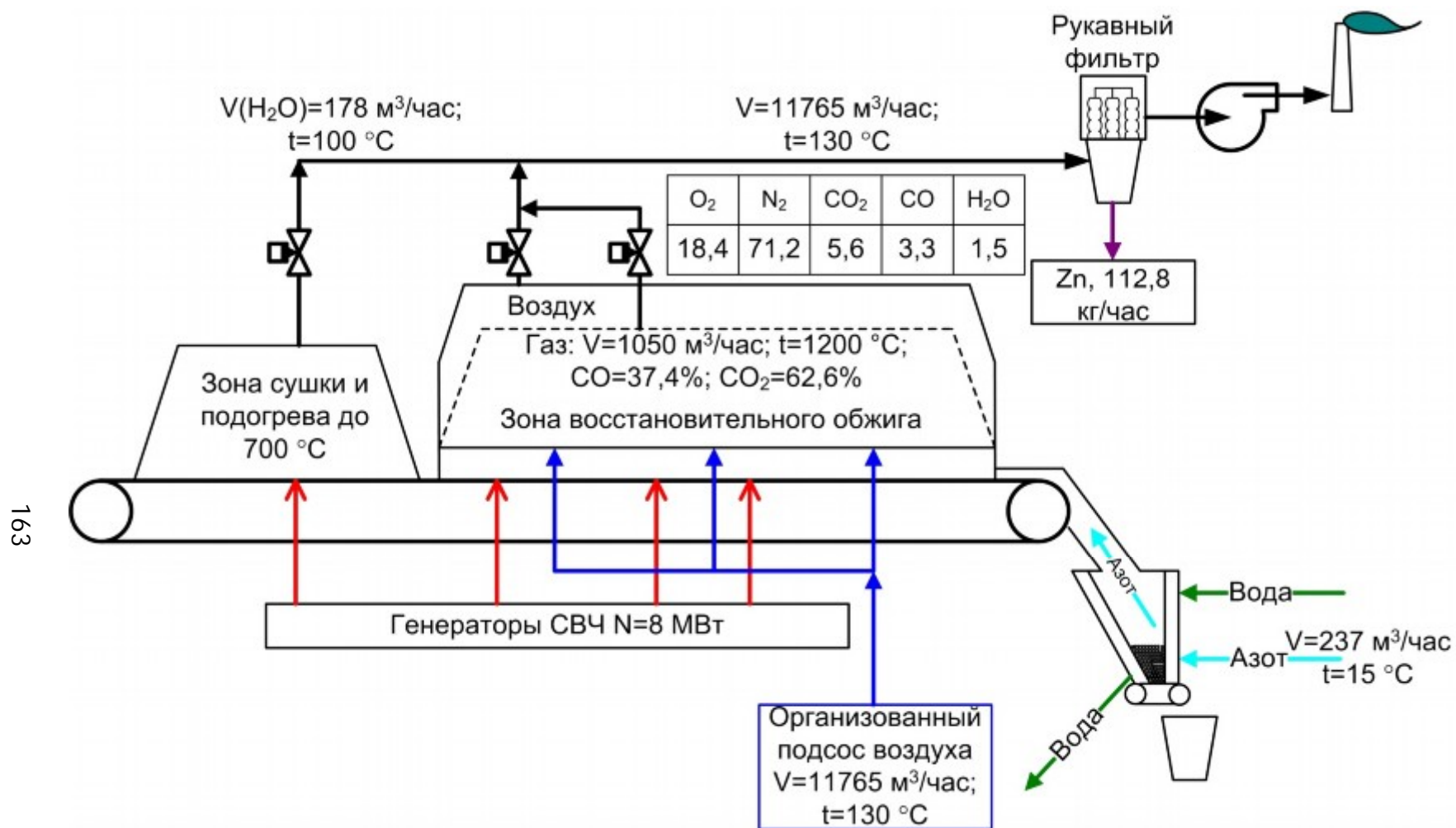


Рис. 2.13. Принципиальная расчетная схема газопотоков конвейерной машины для восстановительного обжига и извлечения цинка с использованием энергии СВЧ

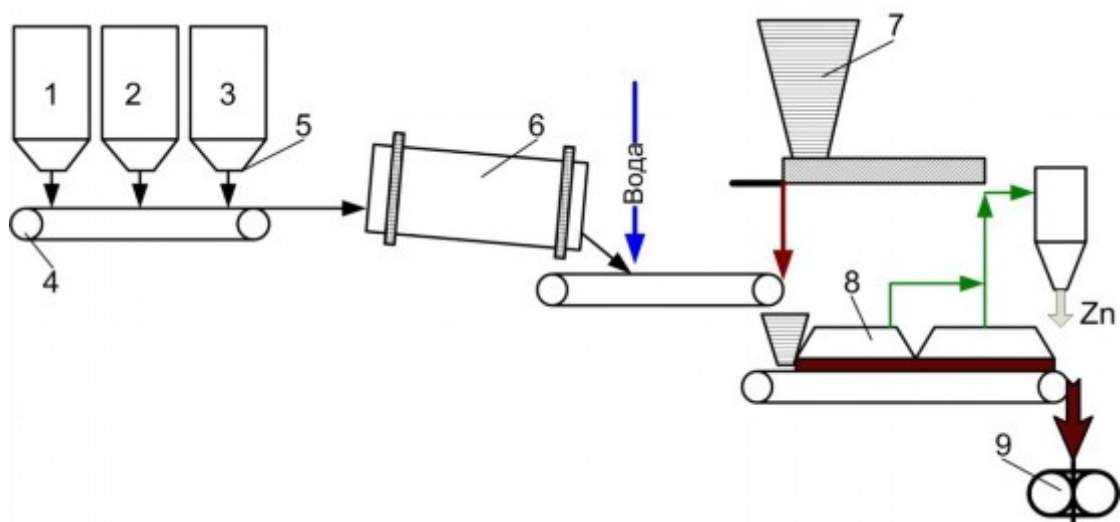


Рис. 2.14. Схема цепи аппаратов:

1 – бункер для мартеновской пыли (фракции  $<0,1$  мм); 2 – бункер для коксовой пыли ( $<0,1$  мм); 3 – бункер для дунита ( $<0,1$  мм); 4 – сборный конвейер шихты;

5 – автомат-весодозатор; 6 – барабан-смеситель; 7 – питатель;  
8 – обжиговая машина; 9 – валковый пресс

Представленная технологическая схема позволяет ориентировочно оценить основные технико-экономические показатели процесса утилизации мартеновских пылей НТМК с возгоном и улавливанием цинка (табл. 2.9).

Таблица 2.9

**Основные технико-экономические показатели процесса утилизации мартеновских пылей НТМК с возгоном и улавливанием цинка**

Технико-экономические показатели	Значения
Производительность, т/ч:	
по влажной шихте	2,25
годному продукту	1,88
Удельная производительность по годному продукту, т/(м <sup>2</sup> ·ч)	0,168
Скорость движения ленты, м/мин	0,467
Высота слоя шихты, м	0,15
Ширина слоя шихты, м	0,40
Длина рабочих зон машины, м:	
сушки и подогрева	10,0
восстановительного обжига	18,0
Максимальная температура газов над слоем, °С	1200
Извлечение цинка в процессе:	

степень, %	85
количество, кг/ч	112,8
содержание в пылях, %	60–70
Содержание в восстановительном продукте, %:	
Fe <sub>общ</sub>	85
Fe <sub>мет</sub>	30
FeO	40

Частично металлизированные брикеты после валкового пресса могут быть использованы в мартеновском производстве в качестве охладителя, подаваемого на поверхность шлака перед разливкой. Цинкосодержащая пыль передается на предприятия цветной металлургии для получения цинковых белил.

Таким образом, в полях СВЧ возможно удалить до 85 % Zn из слоя окомкованных и неомкомкованных шлаков и пылей НТМК при наличии в них 9–10 % твердого углерода и нагреве до 1200–1220 °С. Разработана тепловая схема агрегата для обжига неомкомкованных мартеновских и коксовых пылей в полях СВЧ промышленных частот. Предложена технологическая схема цепи аппаратов для утилизации мартеновских пылей, позволяющая производить 1,88 т/ч готового металлизированного продукта и 112,80 кг/ч цинка. Ориентировочный расход электроэнергии составляет 4,25 МВт·ч на 1 т металлизированного продукта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью обоснования разрабатываемых технологий и способов, обеспечивающих получение качканарских офлюсованных окатышей с высокими металлургическими свойствами, как в исходном состоянии, так и при восстановлении проведено большое количество экспериментальных исследований. При этом использовались различные физико-химические методы, с помощью которых в частности установлено, что обязательным условием получения слабо разрушающихся при восстановлении окатышей является наличие в обожженных образцах определенного количества монооксида железа. С использованием данных, полученных при изучении структурно-фазовых превращений, происходящих в окатышах при восстановлении, а также данных по механизму их разупрочнения, разработана технология получения частично диссоциированных окатышей из качканарского концентрата. При использовании таких окатышей в доменных печах восстановление гематита до магнетита происходит при более высо-

ких температурах, что не приводит к разбуханию окатышей и потере их прочности. Увеличение прочности окатышей с частичной диссоциацией гематита приводит к снижению мелочи в товарной продукции, что влияет на производительность и расход кокса в доменных печах.

Разработана технология доменной плавки на качканарском железорудном сырье смешанной основности, т. е. низкоосновных окатышей и высокоосновного агломерата, слабо разрушающихся при восстановлении и обеспечивающих высокую газопроницаемость в верхних горизонтах доменной печи. Представляет интерес разработанный новый способ доменной плавки сырья с разной основностью, содержащего амфотерные оксиды титана и алюминия, позволяющий повысить технико-экономические показатели работы печей.

Изучено влияние качества концентрата из отдельных разновидностей титаномагнетитовых руд на показатели качества офлюсованных окатышей. Результаты исследований позволяют оценивать свойства офлюсованных окатышей из разновидностей концентратов и их смесей в произвольных пропорциях для широкого диапазона температур обжига и выбирать для промышленного получения те из них, металлургические свойства которых выше.

Разработана экономически эффективная и экологически чистая технология с использованием нетрадиционных видов энергии – энергии сверхвысоких частот. Она реализована для сушки железорудных суперконцентратов, при обогащении лисаковских гидрогетитовых руд, при окисковании доменных шламов и мартеновских пылей и др.

Авторы уверены, что рассмотренные в монографии различные технологии и способы получения окатышей с высокими металлургическими свойствами представляют определенный интерес для специалистов, занимающихся вопросами подготовки железорудных материалов и их использования в металлургических переделах, и будут полезны при совершенствовании существующих и разработке новых технологий, позволяющих получать железорудные окатыши с более высокими металлургическими свойствами. Они также могут быть использованы при оптимизации конструктивных и режимных параметров работы обжиговых конвейерных машин.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меламуд, С. Г. Разработка способов получения прочных окатышей при восстановлении / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев, Л. Б. Брук // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 2. – С. 3–6.
2. Меламуд, С. Г. Улучшение металлургических свойств окатышей Качканарского ГОКа / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // Сталь. – 2012. – № 6. – С. 8–12.
3. Меламуд, С. Г. Разработка способов получения частично диссоциированных окатышей из качканарского концентрата / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 10. – С. 6–10.
4. Технология получения и свойства частично окисленных окатышей из концентратов Качканарского ГОКа / Е. А. Пахомов, Б. В. Качула, С. Г. Меламуд [и др.] // Черная металлургия : Бюл. НТИ. – 1983. – № 13. – С. 49–50.
5. Меламуд, С. Г. Исследование процесса окисления в железорудных материалах при умеренных и высоких температурах / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 6. – С. 383–389.
6. Юрьев, Б. П. Результаты исследования процесса окисления железорудных окатышей / Б. П. Юрьев, Н. А. Спирин // Сталь. – 2011. – № 5. – С. 9–12.
7. Меламуд, С. Г. Изучение процесса низкотемпературного окисления магнетита и титаномагнетита в железорудных материалах / С. Г. Меламуд, Ю. Н. Лопатин, Б. П. Юрьев, // Металлы. – 2002. – № 5. – С. 3–11.
8. Меламуд, С. Г. Исследование шлакообразования при обжиге окискованных продуктов из качканарских титаномагнетитовых концентратов / С. Г. Меламуд, Л. Б. Брук, Г. А. Топорищев // Известия АН СССР. Металлы. – 1978. – № 4. – С. 28–34.
9. Есин, О. А. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 1. / О. А. Есин, П. В. Гельд. – Свердловск : Металлургиздат, 1962. – 671 с.
10. Меламуд, С. Г. Кинетика жидкофазного спекания в дисперсных многокомпонентных системах на основе окислов железа. Сообщение 2 / С. Г. Меламуд, Л. Б. Брук, Г. А. Топорищев // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1979. – № 8. – С. 5–9.
11. Юсфин, Ю. С. Обжиг железорудных окатышей / Ю. С. Юсфин, Т. Н. Базилевич. – М. : Металлургия, 1973. – 272 с.
12. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 340 с.
13. Макаричев, Ю. А. Методы планирования эксперимента и обработки данных / Ю. А. Макаричев, Ю. Н. Иванников. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.

14. Меламуд, С. Г. Исследование влияния параметров термообработки на металлургические свойства качканарских окатышей / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // Сталь. – 2000. – № 12. – С. 3–6.

15. Лопатин, Ю. Н. Упрочнение частично окисленных окатышей на основе исследования кинетики их окисления и напряженного состояния на границе магнетитовых и гематитовых зон : Дис. ... канд. техн. наук. Свердловск : УПИ им. С.М. Кирова, 1985. – 205 с.

16. Меламуд, С. Г. Исследование и разработка оптимальных режимов термообработки качканарских окатышей / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // Сталь. – 2002. – № 11. – С. 5–8.

17. Брук, Л. Б. Влияние структуры расплавленных и твердых силикатных связей на механо-химические свойства окускованных железорудных продуктов : Дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск : Уралмеханобр, 1980. – 138 с.

18. Качула, Б. В. Исследование объемных изменений и прочностных свойств окатышей из титаномагнетитовых концентратов в процессе восстановления : Дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск : Институт металлургии УрО РАН, 1973. – 175 с.

19. Меламуд, С. Г. Исследование кинетики окисления качканарских титаномагнетитов / С. Г. Меламуд, М. П. Авдоница, Ю. Н. Лопатин // Известия АН СССР. Металлы. – 1974. – № 6. – С. 41–44.

20. Danlay, G. Contribution to the Investigation of the Structure of sinters / G. Danlay, J. Hancart, V. Leray [et. al.] // Metall. Rep. G.R.M. – 1976. – № 48. – P. 19–31.

21. Влияние основности окатышей из железорудных концентратов с различным количеством пустой породы на их металлургические свойства / Л. А. Дрожилов, Ф. М. Журавлев, А. В. Мерлин [и др.] // Сталь. – 1975. – № 8. – С. 676–679.

22. Некрасов, З. И. Пути получения окатышей, не разрушающихся при восстановительно-тепловой обработке / З. И. Некрасов, Г. М. Дроздов, Н. А. Гладков [и др.] // Сталь. – 1975. – № 10. – С. 876–881.

23. Влияние магнийсодержащих добавок на металлургические свойства окатышей из качканарских концентратов : В сб. науч. тр. ин-та Уралмеханобр «Окускование руд и концентратов» / С. Г. Меламуд, Е. А. Пахомов, Л. Б. Брук [и др.]. – Свердловск : Изд. ин-та Уралмеханобр. – 1978. – № 5. – С. 69–76.

24. А. с. 670626 СССР. Способы получения окисленных окатышей / С. Г. Меламуд, Е. А. Пахомов, Л. Б. Брук [и др.] // Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1979. – № 24. – С. 89.

25. Меламуд, С. Г. Совершенствование режимов обжига окатышей Качканарского ГОКа / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // Сталь. – 2001. – № 9. – С. 26–31.

26. **Бабарыкин, Н. Н.** О давлении шихты и рациональном очертании заплечиков доменной печи / Н. Н. Бабарыкин // Сталь. – 1969. – № 6. – С. 772–778.

27. **Металлургическая оценка** качканарских окатышей и освоение технологии доменной плавки на них / В. М. Антонов, А. А. Фофанов, Б. В. Качула [и др.] // Сталь. – 1972. – № 8. – С. 681–688.

28. **Технология получения** и свойства частично окисленных окатышей из концентратов Качканарского ГОКа / Е. А. Пахомов, Б. В. Качула, С. Г. Меламуд [и др.] // Черная металлургия : Бюл. НТИ. – 1983. – № 13. – С. 49–50.

29. **Совершенствование технологии** производства окатышей / В. В. Власихин, В. Н. Перетяка, А. М. Дюльдин [и др.] // Горный журнал. – 1979. – № 1. – С. 21–23.

30. **Оптимальные тепловые** параметры обжига и производительность обжиговых конвейерных машин / Г. М. Майзель, А. П. Буткарев, Р. Ф. Кузнецов [и др.] // Черная металлургия : Бюл. НТИ. – 1977. – № 21. – С. 33–34.

31. **Меламуд, С. Г.** Изучение процесса диссоциации гематита при обжиге железорудных окатышей / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев, Н. А. Спирин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 12. – С. 9–12.

32. **Меламуд, С. Г.** Улучшение металлургических свойств окатышей Качканарского ГОКа / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // Сталь. – 2012. – № 6. – С. 8–12.

33. **Юрьев, Б. П.** Влияние качества концентрата из различных титано-магнетитовых руд на металлургические свойства офлюсованных окатышей / Б. П. Юрьев, В. С. Хомутинин // Сталь. – 2000. – № 8. – С. 3–7.

34. **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 280 с.

35. **Математическая** статистика / В. М. Иванова, В. Н. Калинина, Л. А. Нешумова [и др.]. – М. : Высш. шк., 1981. – 371 с.

36. **Влияние режима** охлаждения офлюсованных окатышей на их прочность / Ф. А. Рябоконь, И. А. Копырин, Ю. А. Борц, А. А. Неволин // Металлург. – 1970. – № 9. – С. 8–10.

37. **Юсфин, Ю. С.** Влияние скорости охлаждения на прочность окатышей / Ю. С. Юсфин, В. П. Трофимов, Т. Н. Базилевич // Металлург. – 1978. – № 7. – С. 19–20.

38. **Юсфин, Ю. С.** Обжиг железорудных окатышей / Ю. С. Юсфин, Т. Н. Базилевич. – М. : Металлургия, 1973. – 272 с.

39. **Копырин, И. А.** Производство окатышей различной основности / И. А. Копырин, Ю. М. Борц, Н. Ф. Траур. – М. : Металлургия, 1975. – 192 с.

40. **Горбачев, В. А.** О механизме возникновения напряжений первого рода в окатышах / В. А. Горбачев, Г. М. Майзель, С. В. Шаврин // Известия АН СССР. Металлы. – 1978. – № 2. – С. 84–85.



41. **Архаров, В. И.** Термическое расширение магнетита / В. И. Архаров, В. Н. Богословский, Э. Н. Кузнецов // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1972. – Т. 8. – № 11. – С. 1982–1984.
42. **Меламуд, С. Г.** Изменение прочности железорудных окатышей в процессе термической обработки и способы ее повышения / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // Сталь. – 2014. – № 3. – С. 6–11.
43. **Меламуд, С. Г.** Технология доменной плавки на железорудном сырье с различной основностью / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // Сталь. – 2012. – № 8. – С. 10–12.
44. **Прохорович, В. А.** Повышение влагоемкости железорудных концентратов / В. А. Прохорович, А. Н. Заостровский // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та, 2007. – № 4. – С. 58–59.
45. **Трушников, В. Е.** Исследование комкуемости мелкодисперсного сырья из отходов мелочи фосфоритов и хвостов обогащения, содержащих фосфор и магний, для электротермического получения удобрений / В. Е. Трушников // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2009. – № 12. – С. 83–90.
46. **Луговской, Н. Ю.** Варианты металлургической переработки железных руд Яковлевского месторождения / Н. Ю. Луговской, В. А. Утков // Записки Горного института. – 2013. – Т. 202. – С. 264–265.
47. **Коротич, В. И.** Теоретические основы окомкования железорудных материалов / В. И. Коротич. – М. : Металлургия, 1966. – 152 с.
48. **Определение комкуемости** и рабочей влажности шихт для производства окатышей / В. М. Витюгин, А. В. Витюгин, Н. Н. Бережной, В. И. Смирнов // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. информации. – 1973. – № 23. – С. 29–30.
49. **Юрьев, Б. П.** Совершенствование методики определения показателей комкуемости железорудных концентратов / Б. П. Юрьев, В. А. Гольцев // Обогащение руд. – 2015. – № 2. – С. 23–27.
50. **Похвиснев, А. Н.** Получение прочных при восстановлении окатышей из богатых железорудных концентратов / А. Н. Похвиснев, Н. Ф. Пашков, С. Г. Савельев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1976. – № 9. – С. 30–32.
51. **Влияние гранулометрического** состава железорудного концентрата на качество окатышей / Ю. С. Юсфин, В. П. Трофимов, Т. Н. Базилевич [и др.] // Сталь. – 1979. – № 1. – С. 8–11.
52. **Определение** структурных характеристик исходных окатышей / Г. М. Майзель, В. И. Клейн, В. М. Абзалов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 11. – С. 29–30.
53. **Клейн, В. И.** Влияние исходной структуры на свойства обожженных окатышей / В. И. Клейн, В. М. Абзалов, Б. П. Юрьев // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 8. – С. 10–14.

54. **Особенности** микроструктуры и состава окатышей / З. И. Некрасов, Н. А. Гладков, Ю. С. Шмелев, Г. М. Дроздов // *Сталь*. – 1969. – № 12. – С. 1065–1070.
55. **Назаров, Б. К.** Термодинамический анализ системы  $B_2O_3$ – $CaO$ – $SiO_2$ – $Al_2O_3$  / Б. К. Назаров, А. А. Акбердин // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1986. – № 6. – С. 61–63.
56. **Акбердин, А. А.** Расчет равновесного состояния в системе  $B_2O_3$ – $CaO$ – $SiO_2$ – $Al_2O_3$  / А. А. Акбердин, Г. М. Киреева, И. А. Медведовская // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1986. – № 3. – С. 55–56.
57. **Назаров, Б. К.** Расчет равновесного состояния в системе  $B_2O_3$ – $CaO$ – $SiO_2$ – $Al_2O_3$  / Б. К. Назаров, А. А. Акбердин // *Известия АН СССР. Металлы*. – 1987. – № 4. – С. 220–222.
58. **Меламуд, С. Г.** Влияние добавок боратовой руды на качество окатышей / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // *Сталь*. – 2002. – № 5. – С. 4–8.
59. **Бережной, Н. Н.** Окомкование тонкоизмельченных концентратов железных руд / Н. Н. Бережной, Г. В. Губин, Л. А. Дрожилов. – М. : Недра, 1971. – 200 с.
60. **Булах, А. Г.** Общая минералогия / А. Г. Булах, А. А. Золотарев, В. Г. Кривовичев. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 360 с.
61. **Меламуд, С. Г.** Кинетика десульфурации офлюсованных окатышей ССГОКа в газовых средах с низким содержанием кислорода. Сообщение 1 / С. Г. Меламуд, Л. А. Братыгина, Ф. А. Рябоконт [и др.] // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1984. – № 6. – С. 30–35.
62. **СВЧ-энергетика** / под. ред. Э. Окресса. Т. 2. – М. : Мир, 1971. – 271 с.
63. **Ковнеристый, Ю. К.** Материалы, поглощающие СВЧ-излучение / Ю. К. Ковнеристый, И. Ю. Лазарев, А. А. Равиев. – М. : Наука, 1982. – 164 с.
64. **Меламуд, С. Г.** Применение сверхвысокочастотных полей для сушки железорудных концентратов / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // *Сталь*. – 2012. – № 9. – С. 69–71.
65. **Меламуд, С. Г.** Разработка технологии обогащения лисаковских гидрогетитовых руд с использованием энергии сверхвысоких частот / С. Г. Меламуд, В. Г. Колесник, Б. П. Юрьев // *Бюл. науч.-техн. и экон. информации. Черная металлургия*. – 1999. – Вып. 3–4. – С. 36–45.
66. **Меламуд, С. Г.** Разработка технологии обогащения бурожелезняковых руд с использованием СВЧ-нагрева / С. Г. Меламуд, Б. П. Юрьев // *Сталь*. – 2012. – № 12. – С. 7–12.
67. **Меламуд, С. Г.** Разработка способа окускования доменных шламов и мартеновских пылей с извлечением цинка при нагреве в полях СВЧ / С. Г. Меламуд, В. Г. Колесник, Б. П. Юрьев // *Сталь*. – 2000. – № 1. – С. 86–90.

*Научное издание*

ЮРЬЕВ Борис Петрович  
СПИРИН Николай Александрович  
ШЕШУКОВ Олег Юрьевич  
ГОЛЬЦЕВ Владимир Арисович  
ШЕВЧЕНКО Олег Игоревич  
МЕТЕЛКИН Анатолий Алексеевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ С ВЫСОКИМИ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

Редактор *Н. А. Чудина*

Подписано к печати 09.10.2018. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Ризография  
Усл. печ. л. 10,75. Уч.-изд. л. 12,04. Тираж 200 экз. Заказ № 2051

Ресурсный информационно-образовательный центр  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»  
**Нижнетагильский технологический институт (филиал)**  
622031, г. Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 59

Отпечатано в ОБИР НТИ (филиал) УрФУ